

SERIE A, NO. 723
NO. D'ORDRE :
749

THÈSES

Présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ
(Mention Sciences)

PAR

DAVID KIELY

1^{re} THÈSE. Etude expérimentale de la propagation des ondes de 8mm et de 3cm au-dessus de la mer et à travers la pluie et de 3cm sur les lignes de Goubau.

2^e THÈSE. —Propositions Données Par La Faculté.

Soutenues le 6 Juin 1956 devant la Commission d'examen.

MM. PAUTHENIER Président.

GRIVET }
FORTET } Examinateurs.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41555822_0025

SERIE A, NO. 723

NO. D'ORDRE :

749

THÈSES

Présentées

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ
(Mention Sciences)

PAR

DAVID KIELY

1^{re} THÈSE. Etude expérimentale de la propagation des ondes de 8mm et de 3cm au-dessus de la mer et à travers la pluie et de 3cm sur les lignes de Goubau.

2^e THÈSE. —Propositions Données Par La Faculté.

Soutenues le 6 Juin 1956 devant la Commission d'examen.

MM. PAUTHENIER Président.

GRIVET }
FORTET } Examinateurs.

FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE PARIS

- PROFESSEURS -

Doyen J. PERES

G. JULIA
T Analyse supérieure et Algèbre supérieure
E. DARMOIS
T Enseignement de Physique
R. LEVY
T Physiologie comparée
FOCH
T Mécanique physique et Exper.
PAUTHENIER
T Electrotechnique générale
DE BROGLIE
T Théories physiques
JOB
T Chimie générale
PRENANT
T Anatomie et Histol. comparées
GARNIER
T Géométrie supérieure
PERES
T Mécanique des fluides et appl.
LAUGIER
T Physiologie générale.
M. CURIE
T Physique (P.C.B.)
BARRABE
T Géol. struct. et Géologie appl.
G. DARMOIS
T Calc. des prob. et Phys. Math.
J. BOURCART
T Géogr. Phys. et Géol. dynam.
Mme. JOLIO
T Physique nucléaire
CURIE
et Radioactivité.
PLANTEFOL
T Botanique.
CABANNES
T Recherches physiques.
GRASSE
T Evol. des êtres organisés.
PREVOST
T Chimie organique.
BOULIGAND
T Application de l'analyse à la Géométrie.
CHAUDRON
T Chimie appliquée.
WYART
T Minéralogie.
TEISSIER
T Zoologie.
MANGENOT
T Biologie végétale.
P. AUGER
T Physique quantique et Relat.
MONNIER
T Physiologie des fonctions.
PIVETEAU
T Géologie.
ROCARD
T Physique (E.N.S.).
H. CARTAN
T Mathématiques (E.N.S.).
LAFFITTE
T Chimie générale.
FAVARD
T Mécanique générale.
COULOMB
T Physique du Globe.
Mle. COUSIN
T Biologie animale (P.C.B.).
CHRETIEN
T Chimie minérale.
P. DRACH
T Zoologie.
KASTLER
T Physique.
EPHRUSSI
T Génétique.
WURMSER
T Biol. Physico-chimique.
RIVIERE
T Géologie (S.P.C.N.).
GAUTHERET
T Biologie végétale (P.C.B.).
LUCAS
T Physique.
A. THOMAS
T Biologie cellulaire.
ARNULF
T Optique appliquée.
M. MORAND
T Physique.
SOLEILLET
T Physique.
FORTIER
T Mécan. exper. des fluides.
DANJON
T Astronomie.
FROMAGEOT
T Chimie biologique.
LAPORTE
T Phys. génér. et radioact.
JANET
T Meo. anal. et Mac. céleste.
PETIT
T Biologie maritime.
QUENEY
T Météor. et dyn. atmosphér.
GALLIEN
T Embryologie.
EICHHORN
T Biologie Vég. (P.C.B.).
DE CUGNAC
Biologie Vég. (P.C.B.).
Mle. CAUCHOIS
T Chimie Physique.
THELLIER
T Physique du Globe.

AUDUBERT
L'HERITIER
GRIVET
PONCIN
THIRY
DUBREIL
QUELET
CAGNIARD
CHAMPETIER
CUVILLIER
CUVILLIER
JUNG
TRILLAT
WIEMANN
JACQUINOT
VASSY
DESTOUCHES
M. PRUVOST
AMIEL
HOCART
J. P. MATHIEU
COUTEAUX
MAY
CHOQUET
FELDMANN
GUINIER
JOST
FORTET
SCHWARTZ
CHOUARD
MALAVARD
BRELOT
NORMANT
BENARD
BUVAT
DOGUE
GELOSO
SOULAIRAC
ULRICH
MARECHAL
KIRRMANN
CHADEFAUD
DESTRIAU
Mle. LE BRETON
SALEM
ESCLANGON
LELONG
DEVILLERS
EHRESMANN
FRANCON
GLANGEAUD
GODEMENT
PISCOT
ROCH (E.)
SCHATZMANN
TERMIER
ZAMANSKY

T Electrochimie.
T Génétique.
T Radioélectricité.
T Mécanique des fluides.
T Mécanique appliquée.
T Arith. et théor. des nomb.
T Chimie organique.
T Géophysique appliquée.
T Chimie macromoléculaire.
T Géol. Struct. et Géol.
T Géol. Struct. et Géol. appliquée.
T Pétrographie.
T Chimie physique.
T Chimie (M.P.C.).
T Spectroscopie et physique céleste.
Physique de l'atmosphère.
Théories physiques.
T Géologie.
T Chimie (P.C.B.).
T Minéralogie.
T Physique (P.C.B.).
T Biologie animale (P.C.B.).
Biologie animale (P.C.B.).
T Calc. diff. & Intégral.
Biologie (P.C.B.).
T Physique (P.C.B.).
T Biologie (P.C.B.).
T Calc. des probabilités.
T Méth. Math. de la Physique.
T Physiologie végétale.
T Aviation.
T Calcul différentiel.
T Chimie (P.C.B.).
Chimie (P.C.B.).
Botanique (E.N.S.).
T Statistiques mathématiques.
Chimie (S.P.C.N.).
T Psychophysiologie.
T Physiologie végétale.
T Optique théorique et appl.
T Théories chimiques.
Botanique.
Physique (M.P.C.).
Physiologie générale.
Mathématiques générales.
T Physique (P.C.B.).
T Mathématiques générales.
Anatomie et Histol. comparées.
Topologie Algébrique.
Physique (M.P.C.).
Géographie physique et géologie dynamique.
Mathématiques (M.P.C.).
Calcul. des Probabilités.
Géologie.
Astrophysique.
Plaéontologie stratigraphique.
Mathématiques générales.

Secrétaire Général C. MONIER.

QUELQUES PROBLÈMES POSÉS PAR LA PROPAGATION DES ONDES DE 8 mm ET DE 3 cm, AU-DESSUS DE LA MER ET A TRAVERS LA PLUIE *

par David G. KIELY **

Docteur de l'Université de Paris
M. Sci. A. M. I. E. E.

SOMMAIRE. — Cet article décrit les résultats d'un grand nombre de recherches expérimentales sur la propagation des ondes centimétriques et millimétriques. La première partie, consacrée aux ondes de 8 mm, traite de trois sujets : recherches sur les échos de pluie avec des radars à ondes entretenues ayant un aérien unique ou deux aériens distincts pour l'émission et la réception ; mesures d'évanouissements sur un trajet très court au-dessus de la mer, et mesures du coefficient de réflexion de l'eau pour divers angles d'incidence. La seconde partie concernant la propagation des ondes de 3 cm reprend les mesures d'évanouissements sur un trajet très court au-dessus de la mer, les résultats de ces mesures expliquent la réduction de portée des radars et des balises-radar. On décrit ensuite les mesures de quelques caractéristiques de la propagation sur les lignes de GOUBAU, mesures qui montrent l'importance considérable de l'action de la pluie.

PLAN. — § 1. Introduction d'ensemble. — § 2. Mesures sur la gamme de 8 mm. — 2.1. Mesures relatives aux signaux parasites provoqués par la pluie avec des radars à ondes entretenues. — 2.2. Mesures d'évanouissements sur un très court trajet au-dessus de la mer. — § 3. Mesures sur la gamme de 3 cm. — 3.1. Mesures d'évanouissements sur un trajet au-dessus de la mer. — 3.2. Mesures de quelques caractéristiques de la propagation sur les lignes de Goubau dans la bande de 3 cm.

1. — INTRODUCTION.

Cet article est une étude expérimentale de quelques particularités de la propagation des ondes électromagnétiques de 8 mm et de 3 cm. Il est divisé en deux parties, consacrées chacune aux diverses études expérimentales faites sur l'une et l'autre longueur d'onde.

Dans la première partie traitant des mesures sur la gamme de 8 mm, on décrit trois séries d'expériences. Les mesures sur les échos de pluie (« rain clutter ») avec des radars à ondes entretenues (effectuées en 1952) sont les premières de ce genre ; la complexité, du point de vue mathématique, du problème n'a pas encore permis de l'étudier théoriquement jusqu'ici, mais Ryde a publié une étude sur le problème correspondant, mais plus simple, lorsqu'on utilise des radars à impulsions ; cette étude est discutée dans cet article. Les mesures d'évanouissements sur un court trajet au-dessus de la mer (effectuées en 1952) tendent à confirmer les prévisions de la théorie des « modes normaux » de BOOKER et WALKINGSHAW, qui indiquent que les effets du guidage atmosphérique (« ducting ») et de la superréfraction augmentent rapidement avec la fréquence. La bibliographie ne mentionne jusqu'à présent aucune autre série de mesures sur les évanouissements à cette longueur d'onde. Les mesures de coefficient de réflexion, (effectuées en 1947), furent également les premières de ce genre faites sur une longueur d'onde de 8 mm. Nous en donnons brièvement le résultat.

Dans la seconde partie, concernant les mesures sur 3 cm, on décrit deux séries d'expériences. Les

mesures d'évanouissement le long d'un trajet au-dessus de la mer (effectuées en 1951) furent effectuées en vue de déterminer le pourcentage du temps, aux diverses saisons, pendant lequel les conditions météorologiques provoquaient des évanouissements d'intensités diverses. Bien qu'on ait utilisé des méthodes courantes, aucune mesure n'avait été faite précédemment, sur cette longueur d'onde, le long d'un trajet de cette longueur représentant bien ceux que l'on rencontre dans la marine marchande et les balises. Les mesures sur les lignes de GOUBAU (effectuées en 1950) furent les premières à mettre en évidence l'affaiblissement considérable provoqué par les gouttes de pluie et les pellicules d'eau sur des lignes horizontales exposées aux intempéries. On n'a pas étudié théoriquement ce phénomène ; des travaux ultérieurs de GOUBAU ont mis en évidence une diminution de l'atténuation provoquée par la pluie quand la longueur d'onde augmente, du même ordre que celle que nous avons trouvée. Ce travail est important parce qu'il signale les sévères restrictions imposées par l'influence des intempéries à l'utilisation de ces lignes de transmission.

2. — MESURES SUR LA GAMME DE 8 mm.

2.1. — Mesures relatives aux signaux parasites provoqués par la pluie avec des radars à ondes entretenues.

2.1.1. — Introduction.

Les signaux parasites dus à la pluie ont été étudiés plusieurs fois [1, 2, 3] avec des radars à impulsions fonctionnant en ondes centimétriques, en particulier sur l'onde de 3 cm. Toutefois ces résultats n'ont

* Thèse soutenue devant la Faculté des Sciences de Paris, le 6 juin 1956.

** Royal Naval Scientific Service.

[] Pour tout renvoi entre crochets, se reporter à la bibliographie in fine.

guère de valeur pour la détermination ou la prévision des signaux parasites dus à la pluie dans le cas d'un radar à ondes entretenues fonctionnant dans la bande des 8 mm. On peut, tout d'abord, prévoir, d'après un travail théorique de RYDE [4], que pour cette bande les réflexions dues à la pluie seront plus intenses, dans les mêmes conditions, que celles qui se produisent sur 3 cm ; en outre, chose encore plus importante, le mécanisme de la réception des signaux parasites dus à la pluie est complètement différent dans les deux systèmes : radar à impulsions et radar à ondes entretenues.

Il importe, pour apprécier la différence fondamentale entre les signaux dus à la pluie dans les deux cas, de bien comprendre la nature du champ total rayonné par un aérien tant à son voisinage immédiat qu'à grande distance. Dans la zone de diffraction dite de FRESNEL — autrement dit la région proche de l'aérien — on peut admettre, en première approximation, que l'énergie rayonnée se propage vers l'extérieur sans divergence appréciable, à l'intérieur d'un cylindre dont l'axe coïncide avec celui de l'aérien ; le champ est donc pratiquement limité et concentré dans cette zone. Dans la zone de diffraction de FRAUNHOFER, c'est-à-dire du champ à grande distance, le champ diverge à la manière d'une onde sphérique et la propagation de l'énergie rayonnée ne se fait plus entre des limites précises. Il y a une transition graduelle entre les zones de FRESNEL et de FRAUNHOFER, mais on peut admettre que le changement a lieu à une distance R de l'aérien telle que : $R = D^2/2\lambda$, D étant le diamètre d'ouverture de l'aérien et λ la longueur d'onde. D'après RAMSAY [5], on appelle cette région : « zone de RAYLEIGH ».

Avec un radar à ondes entretenues comportant un aérien et un dispositif de duplexage, et fonctionnant sur un parcours entièrement sous la pluie, on reçoit des échos renvoyés par la pluie à toutes les distances à la fois, et la plus grande partie des échos provient de la pluie à l'intérieur de la partie la plus proche de la zone de RAYLEIGH, où le champ rayonné est intense et la distance des gouttes faible. Avec un radar à impulsions, on ne reçoit d'échos que du volume spatial occupé par l'impulsion à un instant donné, et on n'en reçoit aucun de la pluie dans la partie la plus proche de la zone de Rayleigh, à cause de la durée de rétablissement finie du commutateur transmission-réception, qui rend le récepteur inactif au moment même où la partie de l'écho dû à la pluie est la plus forte. A cause de ce phénomène, il est impossible, vu leur manque de précision inadmissible, d'utiliser, par sommation ou intégration, les observations faites avec des radars à impulsions, pour l'étude du problème des réflexions dues à la pluie lorsqu'on se sert du radar à ondes entretenues.

On peut prévoir que les effets de la pluie sur les radars à ondes entretenues à aérien unique et dispositif de duplexage et sur ceux comportant deux aériens à faible distance l'un de l'autre seront tout

à fait différents, puisque, dans le second cas tout au moins, les parties proches de la zone de RAYLEIGH seront efficacement découplées, et relativement inefficaces en ce qui concerne la production de signaux parasites, à cause de l'écart entre les aériens, qui empêche leurs diagrammes de rayonnement de coïncider. Par suite la forte contribution aux signaux parasites dus à la pluie en provenance de cette région dans le cas du système à aérien unique, sera supprimée dans le cas de l'émission et de la réception séparées. On prévoit donc que les signaux parasites dus à la pluie seront beaucoup moins intenses avec des aériens émetteur et récepteur distincts que dans le cas des radars à aérien unique pour l'émission et la réception ; et on peut également prévoir qu'ils diminueront lentement d'intensité à mesure que l'intervalle entre les aériens du système à aériens séparés augmentera, puisque la zone de RAYLEIGH sera de plus en plus découplée. Le radar à émission et réception séparées est non seulement moins sensible aux réflexions par la pluie, mais il permet d'utiliser la polarisation circulaire pour lutter contre les signaux parasites dus à la pluie. On ne peut pas employer cette technique dans les radars à aérien unique utilisant des dispositifs de duplexage sensibles à la polarisation, qui sont actuellement les seuls systèmes de duplexage à pertes théoriquement nulles pour radars à ondes entretenues, on se sert, en effet, des propriétés de la polarisation circulaire en vue de réaliser un duplexage dans le sens opposé à celui nécessaire pour supprimer les réflexions dues à la pluie. Pour fixer les idées sur les conditions de l'expérimentation, on va exposer brièvement ci-dessous la manière d'utiliser la polarisation circulaire d'une part pour le duplexage, d'autre part pour la suppression des signaux parasites dus à la pluie.

2.1.2. — Utilisation de la polarisation circulaire pour le duplexage et la suppression des échos de pluie.

1) Duplexage.

On peut faire fonctionner l'émetteur et le récepteur d'un radar à ondes entretenues avec une seule antenne, en utilisant de plusieurs manières les propriétés des ondes polarisées circulairement. RAMSAY [6] a donné un exposé complet de ces diverses méthodes. Le dispositif de duplexage utilisé dans nos expériences est celui indiqué ci-dessous.

La figure 1 représente schématiquement l'appareillage. Le dispositif de duplexage comprend deux cornets H_1 et H_2 , le polariseur circulaire, et le « miroir » analyseur. Ce miroir est constitué d'une série de fils parallèles horizontaux fixés sur un support isolant en « onazote » ; ces fils sont écartés d'une fraction de longueur d'onde, et le miroir réfléchit bien les ondes polarisées horizontalement, tandis que les ondes polarisées verticalement le traversent en ne subissant pratiquement aucune action. Le polariseur circulaire se compose d'une série de minces lames de métal encastrées dans une plaque d'onazote. Ces lames sont inclinées de 45° sur

l'horizontale, et dans des plans parallèles entre eux et à l'axe du cornet. Quand une onde plane polarisée verticalement ou horizontalement arrive sur le polariseur, on peut admettre que le vecteur électrique se scinde en deux composantes, l'une parallèle et l'autre normale aux bords des plaquettes. La composante normale aux plaquettes traverse le polariseur sans que sa vitesse de phase change, tandis que la vitesse de phase de l'autre composante, parallèle aux plaquettes, augmente quand elle traverse le polariseur. On a déterminé l'écartement des plaquettes et leur dimension dans le sens de la propagation pour que cette composante soit déphasée de 90° en avant de la composante normale à la sortie du polariseur. L'onde émergente complète est constituée par deux composantes en quadrature dans l'espace et dans le temps : c'est une onde polarisée circulairement. Le cornet H_1 rayonne une onde polarisée verticalement qui traverse le miroir analyseur, monté à 45° sur l'axe du cône. Ce rayonnement traverse ensuite le polariseur circulaire, et les ondes émergentes, polarisées circulairement, sont rayonnées par l'intermédiaire de la lentille, en ayant, par exemple, une polarisation *dextrorsum*. Après réflexion spéculaire par un miroir, le signal reçu est une onde à polarisation circulaire *sinistrorsum*, à cause du renversement du sens de propagation ; cette onde, polarisée horizontalement après avoir traversé le polariseur, est alors réfléchi par le miroir analyseur en direction du cornet H_2 .

2.1.3. — Réduction de l'intensité des échos de pluie.

Une onde incidente polarisée circulairement, *dextrorsum* par exemple, est réfléchi dans une zone pluvieuse sous la forme d'une onde à polarisation circulaire *sinistrorsum*. Ainsi, si l'on réalise un radar à aériens jumelés de telle manière que l'émetteur rayonne par exemple des ondes à polarisation circulaire *dextrorsum*, et que le récepteur soit sensible aux ondes à polarisation *dextrorsum*, il ne recevra théoriquement aucun signal réfléchi spéculairement ou par la pluie. Il pourra toujours recevoir des échos d'objets ne provoquant pas de réflexion spéculaire, mais tendant à diffuser au hasard les ondes polarisées, si bien qu'une certaine partie de l'énergie de l'écho aura une polarisation lui permettant d'exciter le récepteur. Ce mécanisme provoque évidemment une diminution de l'intensité de l'écho par rapport à celle qu'on observait avec un radar normal. Cette diminution dépend du pouvoir réflecteur de l'objectif ; plus il se rapproche d'un miroir parfait, plus la diminution d'intensité est marquée.

Il est évident que le dispositif de duplexage ne permet pas de supprimer en même temps les échos dus à la pluie, puisqu'il est fondé sur la réflexion spéculaire des signaux, ce qui est une caractéristique manifeste des signaux réfléchis par la pluie. Il ressemble, sous ce rapport, aux autres dispositifs proposés de duplexage par polarisation.

2.1.4. — Principaux effets des échos de pluie sur un radar à ondes entretenues.

Les échos de pluie (et, de même, ceux dus aux vagues de la mer) agissent de deux manières sur un radar à ondes entretenues. Dans le premier cas, on a en permanence des signaux parasites engendrés à toutes les distances possibles du récepteur, et l'amplificateur moyenne fréquence doit être réalisé de manière à les recevoir sans surcharge ni blocage. Cela peut être difficile ou même impossible en pratique si le signal est extrêmement intense. De plus le bruit parasite de l'émetteur à la fréquence de l'onde porteuse se retrouve dans le récepteur après réflexion, et il peut accroître le niveau de bruit existant, suivant le niveau du bruit de l'émetteur et des échos de la pluie (ou de mer). Ce phénomène est, naturellement, très gênant, car il réduit la portée du dispositif en réduisant la sensibilité du récepteur.

Pour étudier les effets des signaux parasites sur les radars à ondes entretenues, dans la bande des 8 mm, on a réalisé le programme exposé ci-après.

2.1.5. — Programme d'études.

Le programme d'études des signaux parasites dus à la pluie comportait trois séries d'expériences principales :

a) mesure de l'intensité des signaux réfléchis par la pluie avec un radar à aérien unique pour l'émission et la réception. On a utilisé d'abord un équipement de laboratoire, comportant un klystron de faible puissance comme tube émetteur. Le fonctionnement de cet équipement n'était pas entièrement satisfaisant à certains points de vue, et on a refait plus tard les mesures avec un équipement de type industriel comportant un magnétron comme tube émetteur. On a obtenu des résultats un peu plus précis avec cet équipement ; on en donnera une description ainsi que de l'équipement à klystron ;

b) mesure de l'intensité des signaux réfléchis par la pluie avec un radar à aériens séparés pour l'émission et la réception, pour diverses distances entre les deux aériens. On a utilisé pour l'émission un magnétron ;

c) mesure de la réduction du niveau des signaux réfléchis par la pluie en utilisant la polarisation circulaire.

On a mesuré, en même temps que les signaux sur le radar, le taux de précipitations, et le résultat final du programme d'études a été un réseau de courbes d'intensité des signaux réfléchis par la pluie, exprimée en décibels au-dessous de la puissance émise, en fonction du taux de précipitations (en millimètres d'eau par heure).

2.1.6. — Description de l'appareillage.

a) Radar à antenne unique et à klystron émetteur.

La figure 1 représente schématiquement l'équipement. La tension de sortie du klystron K est modulée à une fréquence comprise à l'intérieur de la bande passante de l'amplificateur ; l'énergie est

émise par le cornet H_1 , après avoir traversé le dispositif de duplexage et la lentille ; les signaux réfléchis sont reçus par le cornet H_2 , de la manière décrite ci-dessus. Il a fallu toutefois perfectionner cette manière de faire simpliste. Tout d'abord, il y

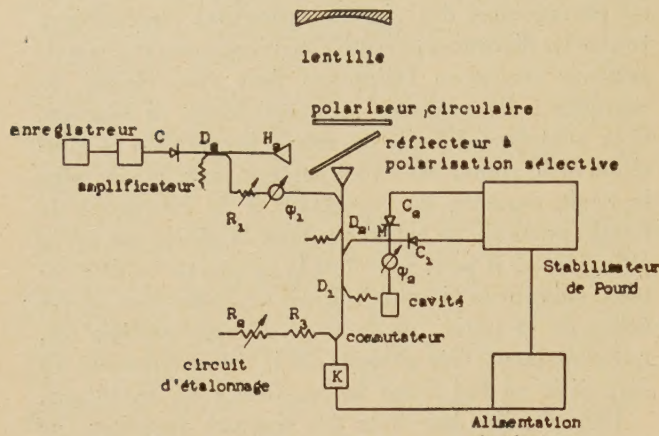


FIG. 1. — Schéma du dispositif à émission et réception commune.

a toujours un certain couplage parasite, faible, entre H_1 et H_2 , dû à la diffusion et à la diffraction le long des bords de l'analyseur et du polariseur, ainsi qu'à une réflexion par la partie arrière de la lentille. La valeur de ce couplage définit le niveau du signal minimum détectable, qui est de l'ordre de -30 dB au-dessous du niveau de l'émission. On a réduit ce niveau par injection d'un signal égal, mais en opposition de phase avec le signal parasite, par l'intermédiaire du circuit comportant deux coupleurs directifs D_1 et D_3 , l'atténuateur R_1 et le déphaseur φ_1 ; on a abaissé ainsi le niveau du signal minimum à 65 dB au-dessous du niveau à l'émission. Pour améliorer la stabilité en fréquence et éviter ainsi les variations de phase du signal dû au couplage parasite, on a stabilisé le klystron par un stabilisateur de fréquence Pound normal, la longueur du circuit de réaction restant, par sa construction, à peu près celle du circuit de couplage parasite. Ce circuit de réaction ne pouvait à lui seul effectuer toute la correction car la réflexion ne se produisait pas en un seul point, mais en de nombreux points de la surface de la lentille. Le stabilisateur comprend le coupleur directionnel D_1 , les jonctions hybrides T , M , le déphaseur φ_2 et la cavité ainsi que les supports de cristal et les circuits associés. Ce système fonctionnait très bien, et on a réalisé une stabilisation à long terme de la compensation qui durait plusieurs heures.

La lentille utilisée était biconcave, du type boîte à œufs, en échelons sur toute sa surface extérieure ; son ouverture était de 61 cm, et son ouverture relative $F : 1,5$. La largeur du faisceau entre deux points à -3 dB était de 1° . On a utilisé des récepteurs constitués chacun par un détecteur à cristal suivi d'un amplificateur vidéo, dont la sensibilité était suffisante pour les mesures, et la stabilité suffisante.

b) Radar à aérien unique pour l'émission et la réception et comportant un magnétron.

Les éléments composants et les principes de fonctionnement de cet appareillage étaient les mêmes que ceux décrits ci-dessus, sauf que le polariseur circulaire était fixé à l'extérieur de la lentille, et que tout l'équipement était construit de manière beaucoup plus rigide. La réalisation électrique et la disposition des éléments étaient tels que la diaphonie était réduite à -75 dB, et qu'une boucle de réaction pour injecter un signal en opposition de phase, comme dans l'appareillage à klystron, n'était pas nécessaire.

c) Radar à aériens distincts pour l'émission et la réception.

Cet appareillage était beaucoup plus simple que celui à aérien commun pour l'émission et la réception, et comprenait deux aériens constitués par des lentilles L_1 et L_2 de 61 cm de diamètre, donnant un faisceau large de 1° entre points à -3 dB, la distance entre leurs axes étant égale à d (fig. 2). La lentille L_1 était utilisée à l'émission, et excitée par le

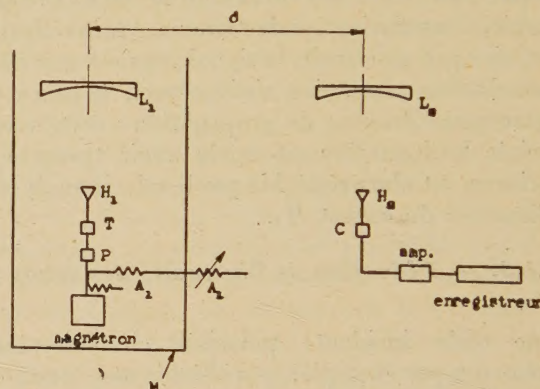


FIG. 2. — Schéma du dispositif à émission et réception séparées.

cornet émetteur à magnétron, par l'intermédiaire d'un résonateur P et d'un couple thermoélectrique T servant à contrôler la puissance émise.

Le magnétron utilisé ici, et pour des expériences antérieures, était modulé en ondes rectangulaires à la fréquence de l'amplificateur sélectif du récepteur. L'intensité du courant était stabilisée par la source d'alimentation du magnétron, et ce tube était refroidi par eau.

Pour étudier la réduction des échos de pluie par l'emploi de la polarisation circulaire, on utilisait l'aérien récepteur représenté figure 2, associé au radar à aérien commun à l'émission et à la réception décrit ci-dessus. Le radar servait à émettre des ondes polarisées circulairement tandis qu'on adaptait au récepteur un polariseur à guides d'ondes, utilisé ici pour transformer la polarisation circulaire en polarisation rectiligne.

2.1.7. — Mesure du taux de précipitations.

On a utilisé deux appareils fournis par l'Office Météorologique (Ministère de l'Air) pour mesurer le taux de précipitations : le pluviomètre enregistreur

à siphon basculant, et l'enregistreur du taux de précipitations à lecture directe. Le premier était le plus précieux pour la bruine et les pluies, jusqu'à environ 5 mm/h ; au-delà les indications devenaient passablement inexactes, à cause de la pente élevée de la courbe enregistrée qu'on devait mesurer pour déterminer le taux de précipitations. Le second donnait une précision constante quel que fût ce taux, hormis les très faibles précipitations, de taux inférieur à 2 mm/h. Il indiquait le taux de précipitations toutes les 3 minutes, et s'avéra très précieux pour l'interprétation de la « structure fine » des averse en liaison avec les enregistrements radar correspondants.

Ces deux instruments étaient donc complémentaires et permettaient à eux deux d'enregistrer tous les taux de précipitation.

2.1.8. — *Emplacement choisi pour les mesures.*

On a effectué ces mesures à l'Établissement Royal de Loch Goil (Argyll), qui fut choisi à cause du taux annuel de précipitation élevé dans ce secteur et de la présence d'un établissement d'État où l'on pouvait abriter l'équipement. Les précipitations se répartissaient de manière assez uniforme tout le long de l'année, et leur taux variait d'une fraction de millimètre par heure à 40 mm/h. Leur taux annuel était d'environ 2 800 mm, un des plus élevés des Îles Britanniques.

2.1.9. — *Conduite des essais.*

a) *Radars à aériens communs émetteur-récepteur.*

Le radar à klystron fonctionnait bien une fois le stabilisateur correctement réglé. Dans ces conditions, la stabilité à long terme était de l'ordre de plusieurs heures. L'appareillage possédait, toutefois, quelques inconvénients propres, tant au point de vue de son fonctionnement que de l'interprétation des résultats. Une faible variation de fréquence provoquait un déphasage important du signal de couplage parasite, et bouleversait le régime de suppression du signal parasite par compensation. L'amplificateur provoquait alors l'enregistrement d'une tension de sortie, et cet enregistrement était souvent très semblable à un enregistrement provenant effectivement d'une réflexion par la pluie. On distinguait les deux signaux parce que le signal réellement dû à la pluie commençait et cessait en même temps que cette dernière. Ce n'était pas le cas avec le signal provenant d'une compensation défectueuse qui augmentait presque toujours constamment jusqu'à atteindre le niveau de saturation.

Il était ainsi relativement facile, en opérant avec soin, de discerner les échos réellement provoqués par la pluie de ceux provenant d'une compensation défectueuse due à une légère instabilité de l'équipement. La sensibilité globale de ce dernier était plutôt réduite. On ne pouvait détecter que des signaux supérieurs à -65 dB au-dessous du niveau de l'émission. On remarque que la précipitation la plus violente observée, correspondant au taux de 14 mm/h, donnait un signal supérieur d'environ

10 dB seulement au niveau de bruit. Ceci signifie que les échos dus à la pluie n'étaient toujours que de quelques dB au-dessus du niveau de bruit, ce qui, pour l'interprétation des résultats et l'exactitude d'ensemble des mesures, était quelque peu insuffisant. Les déviations instrumentales, pour des enregistrements authentiques, étaient petites, mais très nettes et bien définies, et on pouvait les étalonner à $\pm 0,25$ dB près. Il y a lieu d'insister ici sur le fait que non seulement la puissance dans le lobe principal a de l'importance, mais que celle dans les lobes secondaires du diagramme complet de rayonnement contribue également aux réflexions par la pluie ; il suffit donc, pour déterminer le niveau des signaux réellement réfléchis par la pluie, à partir des chiffres ci-dessus donnés par rapport à la puissance émise par le tube, de tenir compte seulement des pertes dans le cuivre des guides d'ondes, dans le système de duplexage et dans le cuivre de la lentille. Le gain de l'aérien n'est pas, dans le cas présent, un paramètre important. Ceci implique que les diagrammes de rayonnement, à l'émission et à la réception, comprenant tous les lobes, principal et secondaires, sont identiques. Pratiquement, cela n'est pas rigoureusement exact, à cause des lobes secondaires, faisant un angle élevé avec l'axe, même si l'on utilise une lentille, et il en résulte une nouvelle source de perte d'énergie pour le signal réfléchi par la pluie. On peut évaluer les pertes totales, pour l'appareillage utilisé, à 3 dB, et les chiffres cités ci-après par rapport à la puissance émise par le tube devront être majorés (autrement dit, on diminuera les chiffres) de cette quantité pour obtenir le niveau des signaux parasites dus à la pluie par rapport à la puissance rayonnée.

L'appareillage à magnétron présente l'avantage considérable, par rapport au dispositif à klystron, d'une sensibilité globale beaucoup plus grande, grâce à l'augmentation de la puissance émise par le tube. On pouvait détecter des échos de pluie qui étaient à 75 dB au-dessous de la puissance émise par le tube, ce chiffre étant limité par le couplage parasite dû au dispositif de duplexage.

b) *Ensemble à aériens d'émission et de réception séparés.*

Dans le cas présent, la conduite des expériences et la méthode de mesure étaient semblables à celles indiquées ci-dessus. On procédait à des tarages après chaque averse de manière à réduire au minimum l'influence des variations légères de la puissance émise par le tube, des caractéristiques des cristaux et d'autres caractéristiques de l'appareillage. Le fonctionnement d'ensemble du radar à aériens d'émission et de réception séparés était très simple, car il était inutile d'annuler par compensation le couplage parasite dû au dispositif de duplexage.

2.1.10. — *Résultats.*

a) *Cas de l'aérien unique.*

Les résultats obtenus avec l'appareillage à magnétron étaient plus précis que ceux qui ont été obtenus

avec le radar à klystron, et confirmèrent ces derniers. Ces deux groupes de résultats sont représentés sur la figure 3, sous forme d'une courbe d'intensité des signaux parasites dus à la pluie, exprimée en

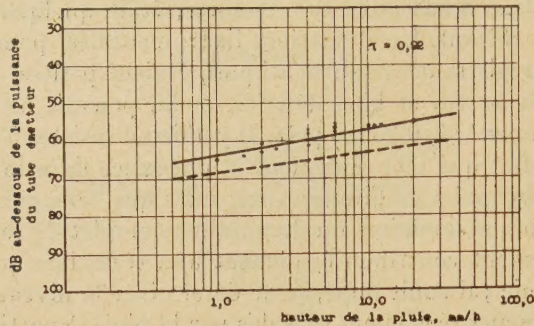


FIG. 3. — Points expérimentaux obtenus avec un dispositif à émission et réception communes.

décibels au-dessous de la puissance H F du tube, en fonction du taux de précipitations en mm/h. La droite passant entre les divers points fut déterminée par la méthode des moindres carrés ; le taux de corrélation r de ces points est de 0,92, et leur dispersion de 3 dB ; elle est due à deux causes principales : premièrement, l'intensité de la réflexion par la pluie dépend fortement du diamètre des gouttes ; en fait l'intensité du signal réfléchi est proportionnelle à la 6^e puissance du diamètre [4], de telle sorte que si pour un même taux de précipitation mesuré le diamètre des gouttes varie, tandis que la concentration volumétrique (qui n'a pas une action marquée) ne change que légèrement, l'intensité du signal réfléchi variera considérablement. Si, par exemple, le diamètre des gouttes double, l'intensité du signal réfléchi augmente de 18 dB, de telle sorte

que de légères modifications dans la répartition des diamètres des gouttes pour un même taux de précipitations observé rendront compte dans une large mesure de la dispersion observée ; deuxièmement, les mesures des taux de précipitations avec le deuxième enregistreur peuvent être entachées d'erreurs. Si, par exemple, il pleut pendant 3 minutes au taux de 14 mm/h, on peut enregistrer une valeur quelconque comprise entre 7 et 14 mm/h, suivant la manière dont l'époque de la précipitation se place par rapport au cycle de mesure de 3 minutes du pluviographe. Des erreurs atteignant 50 % sont donc possibles, mais elles diminuent si la durée de la précipitation à un taux déterminé augmente au-delà de 3 mm. Des erreurs encore plus grandes sont possibles, si, comme c'est souvent le cas, la pluie tombe en rafales irrégulières de durée brève par rapport au cycle de mesure.

Si le vent chassait la pluie au-delà de la cabane d'observation, on observait qu'elle était « stratifiée », avec des zones très nettes de densité des gouttes plus grande ou plus faible. Les zones où la densité des gouttes était plus élevée donnaient lieu à des signaux un peu plus intenses que celles où cette densité était faible, alors que les pluviomètres indiquaient les taux moyens de précipitations. Ce facteur contribue également à la dispersion des résultats.

b) Ensembles émetteurs et récepteurs distincts.

On a mesuré l'intensité des signaux parasites dus à la pluie pour quatre valeurs différentes de la distance d entre les aériens, et les résultats sont indiqués sur les figures 4(a) à 4(d). On a porté sur les graphiques les valeurs r des coefficients de corréla-

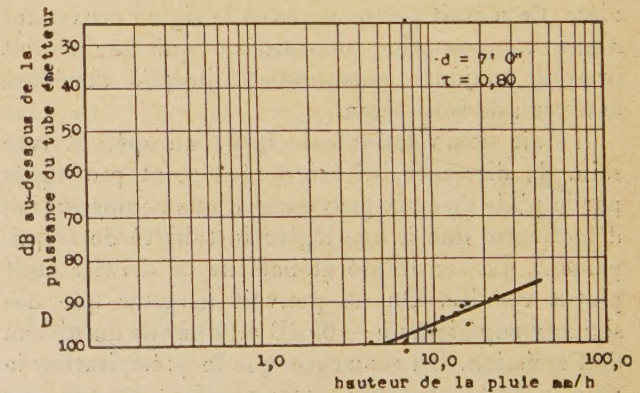
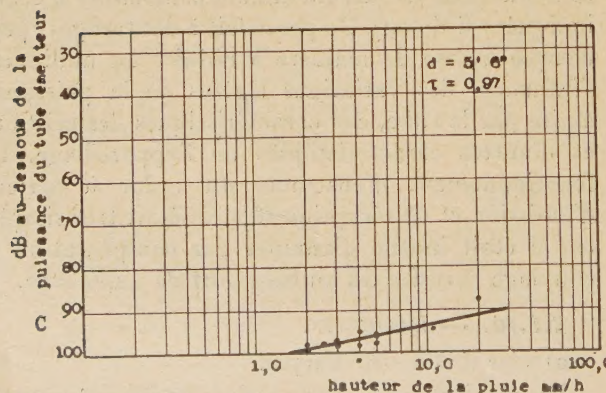
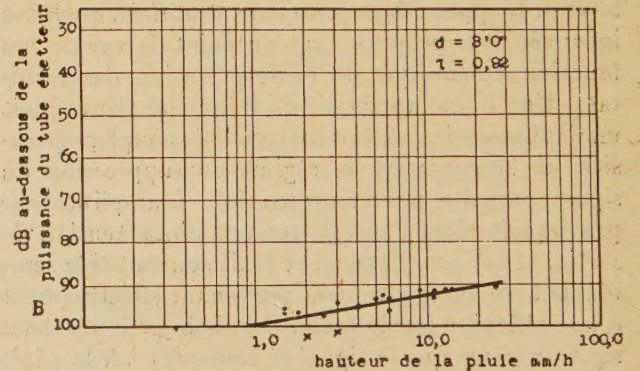
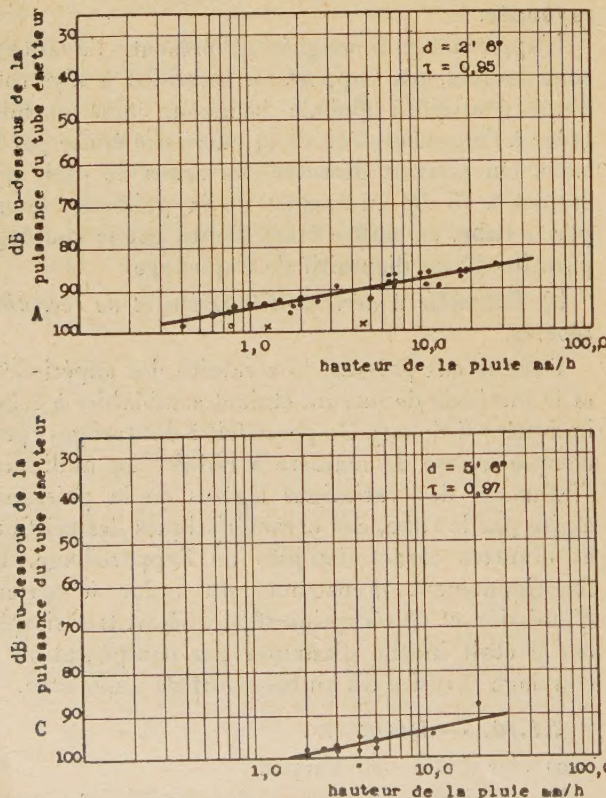


FIG. 4. — Points expérimentaux obtenus avec un dispositif à émission et réception séparées pour des espacements variés des aériens.

tion et déterminé les droites passant entre les points par la méthode des moindres carrés. Les trois premiers graphiques pour $d = 76,2$ cm (2 pieds 6 pouces), 91,4 cm (3 pieds) et 167,6 cm (5 pieds 6 pouces) montrent des courbes ayant à peu près la même pente, tandis que la courbe du quatrième graphique a une pente beaucoup plus forte. Cela s'explique par le fait que, vu que la sensibilité de l'équipement est limitée à 100 dB au-dessous de la puissance du tube émetteur, on ne pouvait observer avec cet écartement des aériens de signaux réfléchis par la pluie que pour des taux de précipitations assez élevés, supérieurs à 7 mm/h. Ces taux élevés de précipitations correspondent à des chutes de pluies beaucoup moins régulières que pour des taux inférieurs, et les résultats donnèrent lieu à une dispersion plus forte, ce qui a réduit la précision de la déter-

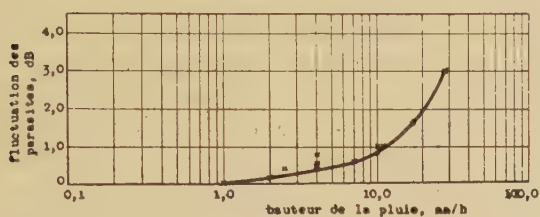


FIG. 5. — Graphique des fluctuations des parasites en fonction de la hauteur de pluie à l'heure.

mination de la variation de l'intensité des signaux réfléchis par la pluie en fonction du taux des précipitations. Les pentes des trois premières courbes de la figure 4 et de celle de la figure 3 sont à peu près égales et en bon accord avec celle prévue par la théorie de RYDE, et représentée sur la figure 3 par une droite pointillée autour des points expérimentaux. Les valeurs des ordonnées et des abscisses des points de cette courbe sur les échelles de la figure 3 n'ont aucune importance : elle est tracée uniquement pour mettre sa pente en évidence.

La figure 5 représente la variation du niveau des signaux réfléchis en fonction du taux de précipitations. Cette courbe a été déduite des diagrammes

enregistrés. On peut obtenir des valeurs maxima approchées des signaux réfléchis en ajoutant la moitié de l'ordonnée de la figure 5 pour un taux donné de précipitations à l'amplitude moyenne de ces signaux pour ce taux de précipitations, déduites des figures 3 ou 4. Les valeurs maxima ainsi obtenues dépendent quelque peu des constantes de temps des appareils, dont la plus grande — environ 0,5 s — était celle de l'enregistreur à plume. La figure 6 montre que cette constante de temps ne doit influencer que très peu sur les valeurs enregistrées.

Cette figure est un exemple de courbe obtenue avec cet enregistreur. La figure 6(a) représente les enregistrements correspondant à quatre averses, entre lesquelles il bruina. L'échelle des ordonnées est graduée en décibels au-dessus de la puissance de l'émetteur, et celle des abscisses en minutes. On notera que la plupart des averses commencent brusquement et cessent progressivement. On a indiqué au-dessus de chaque averse enregistrée par le pluviographe le taux de précipitations. La figure 6(b) représente une petite partie d'une autre averse enregistrée à une vitesse plus grande. Les échelles des ordonnées et des abscisses ont le même sens que dans le cas précédent, et on a noté pour chaque averse sur le graphique le taux maximum de précipitations enregistré.

On procédait à un contrôle d'étalonnage après chaque averse, au cours duquel on arrêta l'enregistreur pendant quelques minutes. Les droites verticales isolées de la figure 6(a) sont des lignes de contrôle de l'étalonnage, et les discontinuités correspondantes de l'enregistrement sont une conséquence de l'arrêt de l'enregistreur.

La figure 7 représente la variation de l'intensité des signaux parasites dus à la pluie en fonction de l'écartement des aériens ; elle a été réalisée à partir des données des figures 3 et 4. Les quatre courbes correspondent à des taux de précipitations de 1,0, 3,0, 10,0 et 20,0 mm/h, et sont en pointillé dans la partie où $d = 61$ cm — laquelle n'a aucun sens phy-

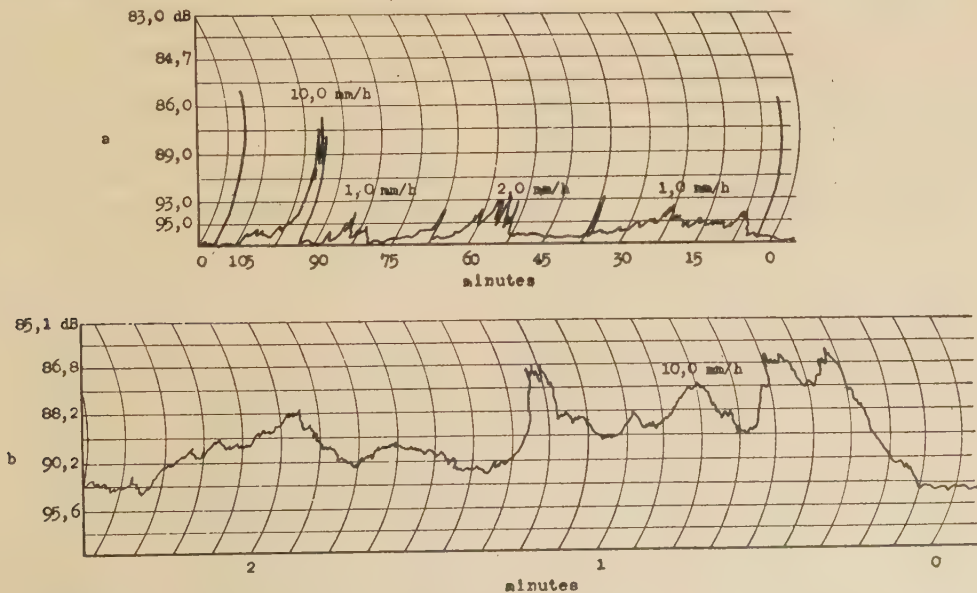


FIG. 6. — Exemples d'enregistrements. a) enregistrement à faible vitesse ; b) enregistrement à grande vitesse.

sique — en vue de raccorder les courbes, définies jusqu'à $d = 61$ cm, aux points d'abscisse $d = 0$, qui correspondent au même aérien pour l'émission et la réception.

Ces courbes indiquent qu'il y a une différence de niveau de 25 dB dans le cas des échos de pluie, sui-

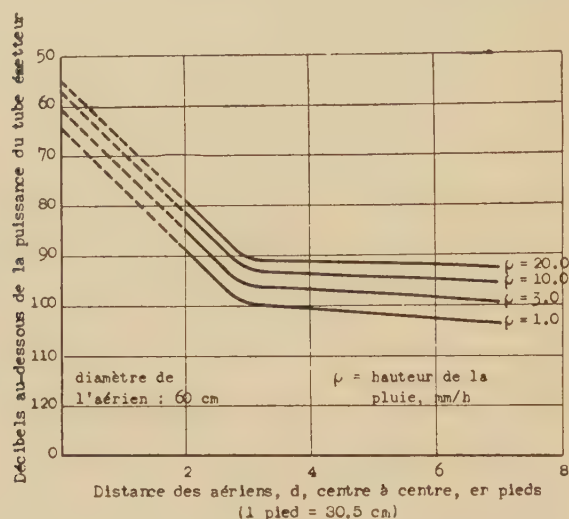


FIG. 7. — Variation du niveau des parasites en fonction de l'espacement des aérans.

vant qu'il s'agit d'un radar à aérien unique, ou d'un radar à aérans distincts pour l'émission et la réception et placés bord à bord. Cette différence provient de la disposition, dans ce dernier cas, de l'écho parasite intense provoqué par la pluie dans le début de la zone de Rayleigh, du fait de l'intervalle existant entre les champs de rayonnement. Ces courbes montrent également que l'intensité des signaux parasites dus à la pluie diminue rapidement quand la distance entre les bords des aérans passe de zéro (aérans bord à bord) à environ 30 cm. Une nouvelle augmentation de la distance entre les aérans n'a plus alors qu'une action relativement faible. C'est un résultat important du point de vue de la réalisation pratique des radars à ondes entretenues, mais on ne doit pas oublier que l'intervalle utile maximum de 30,5 cm (1 pied) observé dans le cas présent avec des aérans de 61 cm (2 pieds) d'ouverture dépend des dimensions géométriques des aérans. Des considérations théoriques indiquent que l'intensité des signaux parasites, dans le cas d'un radar à émission et réception séparées, augmente lentement, avec l'ouverture de l'aérien pour un écartement déterminé, tandis qu'elle est indépendante des caractéristiques de l'aérien quand il sert à la fois à l'émission et à la réception. On diminue donc, dans une faible mesure, l'atténuation considérable des échos de pluie résultant de l'emploi d'un radar à aérans séparés quand on augmente l'ouverture de ces aérans.

On a observé deux fois des précipitations de nature assez particulière : le volume des gouttes était très faible, mais leur densité volumétrique était élevée. C'était plutôt, en fait, une bruine très dense. On a obtenu, dans ces conditions, un signal réfléchi par la

pluie extrêmement faible, de — 89 dB, alors que le taux de précipitations, mesuré au pluviomètre, était de 4,5 mm/h. On avait observé ce phénomène avec un écartement des aérans égal à 76,2 cm (2 pieds 6 pouces), et il apparaît, avec une observation semblable comme un point isolé (x) sur la figure 4(a). D'autres points observés dans des conditions semblables, se placent au-dessous de la ligne — 100 dB de la figure 4(b), les intensités des signaux réfléchis étant respectivement de — 103 et 101 dB pour des taux de précipitations de 2,0 et 3,0 mm/h. Ces observations montrent la dépendance étroite entre l'intensité des signaux réfléchis et le diamètre des gouttes de pluie, puisqu'il y a un écart de 8 dB entre ces points particuliers et les points normaux correspondant au taux de 4,5 mm/h sur la figure 4 (a).

c) Précision des mesures.

Les principaux facteurs influant sur la précision des mesures sont : 1° les erreurs provenant des pluviomètres ; 2° les erreurs de tarage radioélectrique ; 3° les pertes d'énergie dues à l'utilisation d'un amplificateur à bande étroite lorsque le spectre des signaux réfléchis par la pluie a une largeur supérieure à celle de la bande passante de l'amplificateur. On pouvait réduire la première de ces erreurs en procédant aux mesures seulement quand le vent était faible ou nul ; la seconde est très faible et évaluée à 0,25 dB ; la valeur de la troisième est pratiquement inconnue car on ne disposait à l'époque que de très peu de résultats quantitatifs [7] sur les spectres des signaux parasites dus à la pluie, et ils ne s'appliquaient pas à la bande des 8 mm.

Il est donc assez difficile de déterminer la précision globale des mesures, mais si l'on admet que le troisième facteur n'est pas le plus important, on peut évaluer la précision avec laquelle on a mesuré chaque point à $\pm 0,5$ dB. Ceci ne tient pas compte de la dispersion des points, qui est due dans une large mesure aux variations de diamètre des gouttes.

d) Anomalies de propagation.

On a observé plusieurs fois, au cours d'après-midi calmes et chauds, un fort signal à 83 dB au-dessous du niveau de l'émetteur, en l'absence de pluie ou de source visible de signaux réfléchis. Ce signal durait, en général, environ 1 heure, partant du niveau de bruit pour atteindre un maximum, puis diminuer d'intensité. A ce signal se superposait une oscillation lente, de période de 2 à 3 minutes, et très importante. L'aérien était placé à environ 4,5 mètres au-dessus de la mer, et les aérans étaient inclinés vers le haut d'environ 5° pour éviter que leur lobe principal ne soit orienté en direction des collines situées vis-à-vis. Une explication possible de ce phénomène est la captation de l'énergie rayonnée par un guide atmosphérique de faible hauteur au-dessus du niveau de la mer, le rayonnement étant alors dirigé vers ces collines distantes d'environ 1 mille (1 600 m) au lieu de passer par dessus. On a étudié ultérieurement ce phénomène avec une liaison à sens unique, et on a observé des signes manifestes de captation

d'une forte proportion du rayonnement par un guide atmosphérique. Ces expériences sont décrites dans un autre article [7].

e) *Réduction de l'intensité des signaux parasites dus à la pluie par la technique de la polarisation circulaire.*

En utilisant le radar à aérien unique à l'émission, et un aérien séparé à lentille muni d'un analyseur à la réception, on a essayé de mesurer l'intensité des échos de pluie. L'écartement des aériens était de 76,2 cm (2 pieds 6 pouces), et on n'a enregistré aucun signal parasite pour les taux de précipitations ne dépassant pas 15 mm/h. Cela tenait sans aucun doute à la sensibilité insuffisante de l'équipement qui permettait alors de détecter des échos de pluie à 96 dB au-dessous du niveau de l'émetteur. Ainsi, comme le niveau des signaux parasites était de — 86 dB avec une polarisation rectiligne pour le même écartement des aériens, la seule conclusion possible était que la méthode de la polarisation circulaire réduisait d'au moins 10 dB le niveau des signaux parasites. D'autres observateurs ont signalé des diminutions de 14 dB du niveau des signaux parasites en utilisant des radars à impulsions sur 3 cm, si bien que le présent résultat, bien qu'ayant besoin d'être complété, n'est pas incompatible avec ces chiffres.

2.1.11. — Conclusions.

On a étudié l'intensité des échos de pluie avec des radars à aérien unique ou à aériens séparés pour l'émission et la réception, et les conclusions les plus importantes à tirer des résultats sont : 1°) l'intensité des signaux parasites est d'environ de 35 dB plus élevée dans le cas de l'aérien unique que dans celui des aériens séparés ; 2°) il existe un écartement utile maximum dans le cas des aériens séparés, qui est d'environ 76 cm (2 pieds 6 pouces) de centre à centre des aériens de 61 cm (2 pieds) de diamètre, et 3°) lorsque le taux de précipitations varie de 1 à 20 mm/h, l'intensité des signaux varie seulement de 10 dB. La figure 6 représente l'allure générale des courbes de signaux parasites, et indique que l'amplitude des fluctuations est de l'ordre de 4 dB. Du fait de la sensibilité insuffisante de l'équipement en ce qui concerne la réduction d'intensité des signaux parasites par la méthode de la polarisation circulaire, on n'a pas obtenu de résultats précis.

2.2. — Mesures d'évanouissements sur un très court trajet au-dessus de la mer.

2.2.1. — Introduction.

Il y a quelques années qu'on estime que l'influence des gradients verticaux de l'indice de réfraction dans la basse atmosphère sur la propagation des micro-ondes sont d'autant plus marqués que la longueur d'onde est plus faible. BOOKER et WALKINSHAW [8] ont montré qu'on peut prévoir que la courbure des rayons et la captation partielle ou totale par les guides atmosphériques sont de plus en plus accentués

à mesure que l'on passe de la bande des longueurs d'onde centimétriques — qui a fait l'objet d'études expérimentales à ce sujet — à celle des longueurs, millimétriques qui est actuellement relativement inexplorée. BOOKER et WALKINSHAW [8] écrivent qu'on peut s'attendre à ce qu'un régime semi-permanent de superréfraction s'établisse au-dessus de la mer pour les ondes de l'ordre de 1 cm de longueur, grâce à un guide atmosphérique semi-permanent lié à l'évaporation, d'une épaisseur de l'ordre de 3 à 6 cm, dont WEST [9] a prévu l'existence au-dessus des eaux de l'Europe septentrionale. Cette prévision fut confirmée par l'expérience, et, en fait, ce guide atmosphérique en liaison avec l'évaporation a une épaisseur beaucoup plus grande dans des régions maritimes autres que les eaux de l'Europe septentrionale, et donne lieu à des phénomènes semblables dans la bande des 10 cm.

Plusieurs observations isolées faites par des chercheurs dans la bande des 8 mm indiquaient l'existence de phénomènes de réfraction importants, et au cours de quelques mesures de signaux parasites dus à la pluie l'auteur du présent travail obtint certains enregistrements qu'on peut expliquer par une captation assez complète par un guide atmosphérique.

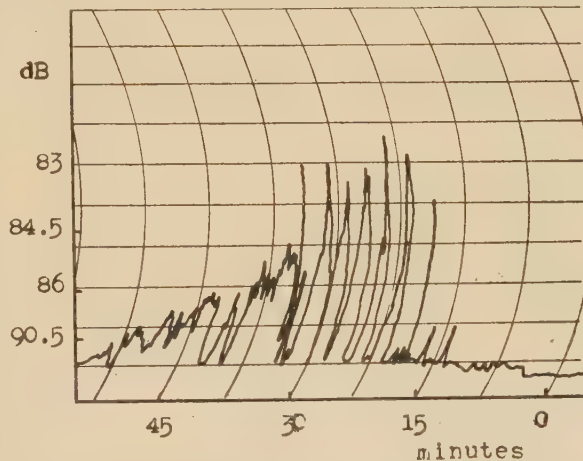


Fig. 8a. — Enregistrement d'un écho anormal obtenu avec un dispositif de radar à émission et réception séparées.

Les conditions d'observation de ce phénomène ont été précisées précédemment par l'auteur § 2.1.10 d. Un exemple est donné figure 8 a.

Un mécanisme de ce genre pourrait rendre compte de la très forte intensité du signal. On décida d'établir une courte liaison à sens unique au-dessus du Loch Goil, et d'enregistrer les fluctuations des signaux pour voir s'il y avait des signes nets de propagation des signaux à l'intérieur de guides atmosphériques, se manifestant eux-mêmes par des évanouissements du signal enregistré. Pour observer ce phénomène, on admit qu'un émetteur bas, placé à environ 4,50 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer, et qu'un récepteur surélevé, à environ 30 mètres au-dessus de ce niveau, conviendraient, étant donné qu'il y avait de grandes chances pour que l'émetteur soit à l'intérieur des guides atmosphériques bas susceptibles de se former, tandis que

le récepteur serait au-dessus de ces guides ; la captation du signal dans le guide atmosphérique se manifesterait alors par un évanouissement du signal reçu. Au cours de ces mesures, les marées provoquaient des variations du niveau de la mer de l'ordre de 1,50 mètre.

Pour pouvoir les suivre plus facilement, on a effectué ces recherches à proximité du Loch Goil où l'on procédait aux mesures sur l'intensité des échos de



FIG. 8b. — Situation du récepteur et de l'émetteur. Longueur de la liaison 1 609 mètres.

pluie (fig. 8b). Elles ont duré cinq semaines seulement, en octobre et novembre 1952 ; on les considérerait uniquement comme des expériences-pilotes, et cependant elles ont fourni quelques renseignements très significatifs et intéressants.

2.2.2. — Description de l'équipement et de l'emplacement.

L'équipement utilisé était très simple. Le récepteur comportait un détecteur à cristal excitant un amplificateur accordé sur 3 200 Hz, et l'émetteur était un klystron modulé à la même fréquence. On utilisait un ensemble détecteur-amplificateur semblable pour contrôler le fonctionnement de l'émetteur, et les amplificateurs du récepteur et de contrôle actionnaient des enregistreurs à plume. On a étalonné le récepteur à l'aide d'un atténuateur HF taré. Les deux aériens étaient des lentilles de 61 cm de diamètre, excitées par de petits cornets coniques ; leur lobe principal avait une ouverture de 1° à -3 dB, et ils étaient protégés des intempéries par des fenêtres en onazote qui, sèches, étaient transparentes aux ondes de 8 mm. La stabilité en fréquence de l'équipement, avec son klystron alimenté par une alimentation stabilisée, était, en général, très bonne. Le récepteur de contrôle de l'amplificateur enregistrait les fluctuations de la puissance du klystron, qu'on notait sur le diagramme du récepteur proprement dit ; au cours de plusieurs heures de fonctionnement, la puissance de sortie du klystron ne variait que d'une petite fraction de décibel.

On a trouvé au voisinage du Loch Goil un emplacement où le récepteur était approximativement à 30 mètres et l'émetteur à 4,5 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer. L'angle de site de l'émetteur par rapport au récepteur était un peu supérieur

à 1° ; on pouvait donc prétendre avec assurance que la mer n'était pas « éclairée » avec un lobe principal ayant une ouverture de 1° à -3 dB, sauf par les lobes secondaires, et que le signal arrivant au récepteur n'avait réellement rien à voir avec une réflexion.

2.2.3. — Résultats expérimentaux.

Au cours des cinq semaines qu'a duré cette liaison, les principales caractéristiques des signaux reçus furent les suivantes :

a) les caractéristiques des signaux dépendaient fortement des conditions atmosphériques et variaient fréquemment en fonction de ces dernières. Par temps d'orage, l'intensité du signal était très stable, mais il arrivait souvent, quand le vent devenait moins violent ou tombait, que l'intensité du signal commençât immédiatement à subir des fluctuations de ± 1 dB à ± 2 dB ;

b) on observa plusieurs fois une « scintillation » du signal, qui concordait avec des périodes de temps sec, avec peu ou pas de vent. L'importance de cette scintillation était inférieure à 1 dB, ce qu'on pouvait prévoir pour un court trajet de ce genre ;

c) il y avait très souvent du fading et son amplitude variait entre 2 et 16 dB, et sa durée entre 15 minutes et plusieurs jours. Les évanouissements profonds étaient toujours associés à des périodes de calme, des périodes de temps chaud, tandis que ceux de faible amplitude se produisaient dans des conditions météorologiques plus variées, entre autres par vent faible ou modéré ;

d) les signaux diminuaient d'intensité par temps pluvieux à cause de l'affaiblissement provoqué par la pluie sur le trajet des ondes et de l'atténuation par la couche d'eau déposée par la pluie sur les fenêtres en onazote. Cette atténuation, parfois très considérable — de l'ordre de 20 dB — était différente pour les deux fenêtres : elle dépendait de la direction du vent et de la quantité d'eau sur les plaques d'onazote.

Toutefois, on a observé que l'affaiblissement du signal précédait de 10 à 15 minutes la chute de pluie : l'intensité du signal diminuait de 1 ou 2 dB avant que la pluie ne commençât réellement à tomber, comme si une variation de température ou d'état hygrométrique précédant la pluie agissait sur les conditions de réfraction sur le trajet des ondes. Il est, en effet, possible qu'il se produise une modification de la répartition de la teneur en vapeur d'eau dans le sens vertical avant une averse. Il est difficile de dire si les affaiblissements importants des signaux pendant la pluie provenaient uniquement de l'atténuation par l'eau sur le trajet des ondes et sur les plaques d'onazote, ou en partie d'un évanouissement par réfraction prolongeant la diminution initiale du niveau du signal.

Une caractéristique significative de ces variations d'intensité des signaux, en particulier des fadings intenses, est le fait qu'ils furent observés sur un trajet aussi court. En se basant là-dessus, on peut

prévoir que sur un trajet plus long, de plusieurs kilomètres, les variations d'intensité seront beaucoup plus intenses si le parcours des ondes dans le milieu stratifié est plus long.

TABLEAU I

PROFON- DEUR DU FADING EN DÉCI- BELS	DURÉE	OBSERVATIONS
2	1 h.	Temps calme ; couvert et gris.
2	8 h.	Temps froid ; vent faible.
4,5	3 h.	Temps froid ; vent faible.
4	30 min.	Temps calme, ensoleillé ; ciel bleu dégagé ; petite brise.
4	30 min.	Temps calme, ensoleillé ; ciel bleu dégagé ; petite brise.
13,5	15 min.	Temps calme, tiède et humide ; de temps à autre : brise très légère.
10	15 min.	Temps calme, tiède et humide ; de temps à autre : brise très légère.
15	30 min.	Temps calme, tiède et humide ; de temps à autre : brise très légère.
16	1 h.	Temps calme, tiède et humide ; de temps à autre : brise très légère.
3	1 h.	Temps clair ensoleillé, froid ; averses intermittentes ; vent faible.
3	1 h.	Temps clair ensoleillé, froid ; averses intermittentes ; vent faible.
5,5	15 min.	Temps calme, couvert et gris.
2	30 min.	Temps calme ; couvert et gris.
7	6 jours	Invariablement : froid glacial, calme plat pendant toute la durée de cette période.
1,5	6 h.	Pas de vent ; calme ; nuit froide.
1,5	3 h 30 m.	Ciel couvert et gris ; pas de vent.

Le tableau ci-dessus indique les caractéristiques principales des évanouissements de signaux dus à d'autres causes que la pluie.

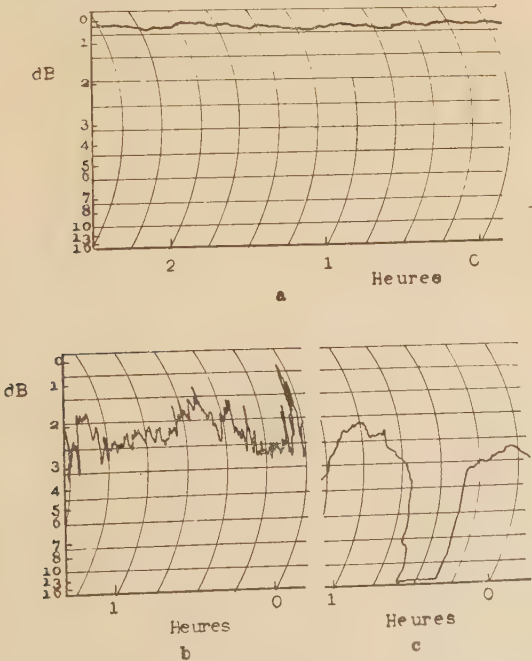


FIG. 9. — Enregistrements montrant : a) signal stable normal ; b) signal scintillant ; c) évanouissement profond enregistré sur la liaison à une voie.

La vapeur d'eau présente dans l'atmosphère, même saturante, ne contribuait, sur ce parcours, que pour moins de 0,1 dB à l'affaiblissement ; l'atténuation due à la vapeur d'eau ne modifiait donc pratiquement pas l'intensité des évanouissements.

La figure 9 représente quelques types de caractéristiques de signaux :

9(a) un signal à niveau constant associé à un régime de vent créant une atmosphère très homogène,

9(b) un signal affecté de « scintillation »,

9(c) un exemple de fading intense associé avec un temps calme.

On peut admettre que la cause la plus probable de ces évanouissements est un guide atmosphérique, au niveau de la mer ou surélevé, qui capte de manière plus ou moins complète le signal émis. L'angle de site de 1° du faisceau et le fait que pratiquement toute son énergie est concentrée dans un faisceau étroit de 1° sont des conditions favorables à la capture. La situation serait probablement très différente si les deux extrémités de la liaison étaient à la même altitude — basse ou élevée — parce que la courbure par réfraction des rayons n'affecterait pas les signaux exactement de la même manière.

2.2.4. — Conclusion.

La conséquence la plus importante à tirer de ces expériences est le fait qu'elles montrent le rôle majeur des phénomènes atmosphériques sur la propagation des ondes millimétriques. Bien qu'on pût prévoir ce résultat à partir de recherches théoriques antérieures, on n'avait aucune idée de l'ordre de grandeur des phénomènes.

2.2.5. — Mesure du coefficient de réflexion de l'eau.

Nous ajouterons à ce chapitre les résultats de mesures (faites en mars 1947) du coefficient de réflexion de l'eau pour une longueur d'onde de

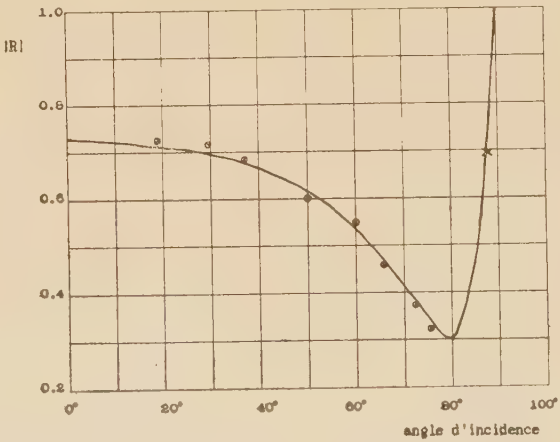


FIG. 10. — Courbes théoriques. . points expérimentaux à $\lambda = 8,7$ mm ; $\times$ point expérimental à $\lambda = 6,35$ mm.

8,7 mm et de divers angles d'incidence, mesures qui ont été faites en même temps que les essais indiqués dans ce chapitre et qui semblent nouvelles.

L'appareillage expérimental comportait un émet-

teur et un récepteur, montés sur des bâtis en métal permettant de faire varier les hauteurs des aériens au-dessus d'un bac rempli d'eau placé entre ceux-ci. On maintenait constante la distance horizontale entre le récepteur et l'émetteur, et on pouvait faire varier de 1,20 mètre environ la hauteur de l'un ou l'autre aérien au-dessus de la surface de l'eau. Le bac mesurait 2,70 mètres sur 0,90 mètre. Les aériens et les circuits HF étaient montés sur des plate-formes à bascule fixées aux bâtis, ce qui permettait d'orienter les deux ensembles vers le bas en direction de la surface de l'eau ou directement l'un vers

l'autre. La largeur des faisceaux était suffisamment faible pour permettre de recevoir indépendamment les rayons directs et les rayons réfléchis. La polarisation était verticale. Les résultats de la mesure de $R = |R' + jR''|$ module du coefficient de réflexion si R' et jR'' en sont les composantes réelle et imaginaire, sont représentés sur la figure 10. La courbe est une courbe théorique due à SAXTON [10]. On ne s'est pas servi de ce point dans l'étude théorique ci-après.

(à suivre)

QUELQUES PROBLÈMES POSÉS PAR LA PROPAGATION DES ONDES DE 8 mm ET DE 3 cm, AU-DESSUS DE LA MER ET A TRAVERS LA PLUIE *

par David G. KIELY **

Docteur de l'Université de Paris
M. Sci. A. M. I. E. E.

3. — MESURES SUR LA GAMME DE 3 cm.

3.1. — Mesures d'évanouissements sur un trajet au-dessus de la mer.

3.1.1. — Introduction.

Cette étude expérimentale avait pour objet de déterminer l'intensité et la durée des évanouissements, ainsi que leur fréquence, à diverses époques de l'année, et de présenter les résultats d'une manière utile pour l'exploitation.

Cette étude a duré de juillet 1950 à janvier 1951, et on a effectué des enregistrements caractéristiques des saisons d'été, d'automne et d'hiver. On n'a pas essayé dans ce travail de déterminer l'origine physique des évanouissements observés, puisqu'elle a été étudiée à fond par BURROWS et ATWOOD [11]. La difficulté d'exécution de mesures météorologiques précises empêchait de comparer en détail les caractéristiques du fading avec les conditions météorologiques locales appropriées.

On notera que de très légers changements de l'atmosphère suffisent pour transformer complètement les conditions de propagation, et peuvent augmenter ou réduire considérablement la portée utile des radars. Par conséquent, les mesures radioélectriques offrent beaucoup plus de facilité que les mesures météorologiques pour l'étude de ces phénomènes de propagation, et il est extrêmement difficile d'établir des corrélations précises entre ces deux groupes, parce que ces phénomènes résultent de très faibles variations des facteurs météorologiques.

3.1.2. — Absorption.

La réduction de la portée des radars due à l'absorption est peu importante par rapport aux diminutions de portée causées par les conditions météorologiques mentionnées ci-dessus. Vers 10 000 MHz, le facteur le plus important de l'absorption atmosphérique est en général le brouillard, qui donne lieu à une atténuation de 0,2 dB/km quand la visibilité est réduite à 30 mètres. L'atténuation due à la pluie est, à cette fréquence, faible par rapport à celle causée par le fading, et peut on la négliger sans inconvénients dans les expériences décrites. SAXTON et HOPKINS [12] ont décrit complètement l'influence de l'absorption et de la diffusion atmosphériques.

3.1.3. — Étude expérimentale.

a) Mesures radioélectriques.

On a effectué des mesures de champ (pour un seul sens de propagation) entre Selsey Bill et Eastney Fort East, près de Portsmouth Harbour (figure 11).

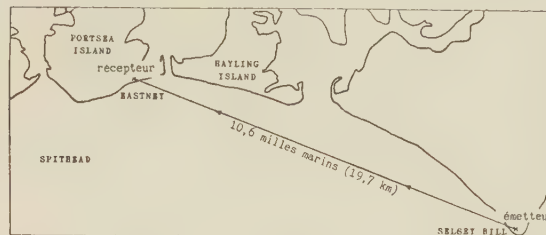


FIG. 11 a. — Situations du récepteur et de l'émetteur. Longueur de la liaison : 10,6 milles marins (19,7 km).

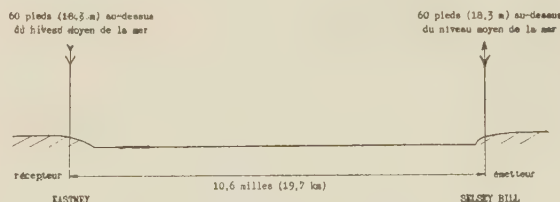


FIG. 11 b. — Schéma du trajet EASTNEY-SELSEY BILL.

L'émetteur était placé sur une tour à 18 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer, à la pointe de Selsey Bill, et le récepteur était à la même hauteur sur le toit d'un bâtiment à Eastney. Le trajet des ondes était entièrement au-dessus de la mer, long de 10,6 milles marins (19,7 km) et égal à 57 % de la distance de l'horizon radioélectrique. La longueur de ce trajet fut choisie de manière que les évanouissements et les autres particularités des signaux fussent caractéristiques de la portée la plus importante en pratique. Le « point de fonctionnement » sur la courbe (intensité du champ/distance à partir de l'émetteur) étant, dans cette étude, juste au-delà du dernier maximum de la courbe d'interférences.

b) Équipement à l'émission.

L'équipement à l'émission se composait d'un oscillateur sur 3 cm, type QK-300, modulé par un signal rectangulaire à 80 kHz. Une sonde dans le guide d'ondes allant à l'aérien empruntait une petite partie de la puissance émise pour la contrôler. La puissance ainsi recueillie était appliquée à une diode à cristal, et le courant ainsi obtenu passait par un

* Voir le numéro de novembre 1956. pp. 233-244, contenant le sommaire de l'article complet.

** Royal Naval Scientific Service.

microampèremètre, dont on lisait l'indication toutes les heures, de jour et de nuit.

L'aérien comportait un réflecteur parabolique du modèle classique de 149 cm ayant un gain de 37 dB par rapport au radiateur isotrope, et la puissance de sortie mesurée de l'émetteur était en moyenne de 18 mW. La polarisation était horizontale et la fréquence utilisée de 9 375 MHz.

c) Équipement à la réception.

Le récepteur, à changement de fréquence, comportait un oscillateur local type QK-300, et actionnait un milliampèremètre enregistreur standard, dont la bande se déplaçait à la vitesse d'un pouce (25,4 mm) par heure. L'aérien récepteur était un petit « fromage » avec un gain de 28 dB par rapport au radiateur isotrope. On avait placé à côté du récepteur un dispositif de contrôle d'ensemble identique à celui de l'émetteur. L'aérien du dispositif de contrôle était un petit cornet rectangulaire placé à 1,80 mètre en arrière de l'aérien récepteur, qu'on pouvait orienter successivement en direction de l'émetteur éloigné et du dispositif de contrôle.

3.1.4. — Conduite des expériences.

a) Émetteur.

On mesurait la puissance de l'émetteur au klystron et à l'aérien à l'aide d'un pont à thermistance. La différence entre ces mesures correspondait à la perte d'énergie dans les guides d'ondes allant à l'aérien. La puissance fournie à l'aérien était de 18 mW, et les pertes dans les guides d'ondes de 1 dB. On avait placé une sonde alimentant un cristal détecteur dans les guides d'ondes au voisinage du klystron, et le courant à la sortie du détecteur permettait de mesurer la puissance de l'émetteur à l'aide d'un atténuateur HF.

b) Récepteur.

On déterminait la caractéristique globale entrée/sortie du récepteur à l'aide d'un générateur étalonné, d'un atténuateur étalonné et d'un signal pro-

tion des courants indiqués par le milliampèremètre enregistreur ; la figure 12 représente un exemple typique, où l'on notera que cette courbe est linéaire dans un intervalle d'environ 20 dB. Cette linéarité résulte de la combinaison des caractéristiques du circuit de l'intégrateur d'impulsions et du récepteur superhétérodyne. On peut faire correspondre les courants enregistrés par le milliampèremètre à la puissance fournie par l'aérien au récepteur, si l'on connaît l'étalonnage relatif d'ensemble (en décibels) et la sensibilité absolue (en microwatts) du récepteur correspondant à un point de cette courbe. Le réglage du gain de l'émetteur restait invariable pendant toute la durée de l'étalonnage et de l'enregistrement.

3.1.5. — Fonctionnement de l'équipement.

On a éprouvé, en septembre 1950, quelques ennuis résultant de pannes de l'émetteur de Selsey Bill. À part cela, l'équipement a fonctionné de façon parfaite et a fourni pratiquement sans interruption des enregistrements, hormis quelques rares occasions où l'on a arrêté son fonctionnement pour le vérifier et le tarer.

3.1.6. — Mesures météorologiques.

Les services du H. M. S. Daedalus, unité de l'Office Météorologique ancrée à Lee-on-Solente, effectuait les observations météorologiques. Cet emplacement n'était pas au voisinage immédiat du trajet des ondes entre Selsey Bill et Eastney, mais il était suffisamment proche pour que les conditions météorologiques y soient dans l'ensemble identiques. On observait toutes les heures les températures enregistrées par des thermomètres à réservoir sec et humide (psychromètre), la pression barométrique et l'état hygrométrique de l'atmosphère à une hauteur (à peu près) égale à celle des aérions, la direction et la vitesse du vent régnant, et le genre de temps (pluie, brouillard, etc...).

De plus, le poste de garde-côtes de Selsey Bill rendait compte du temps. On avait ainsi une idée générale du temps qui régnait à l'extrémité émettrice de la liaison.

3.1.7. — Données recueillies au cours des observations.

La figure 13 représente plusieurs enregistrements caractéristiques de divers régimes de niveau des signaux, à savoir « élevé et variable », « intensité moyenne et constant », « faible et variable », et « faible avec un fading intense ». Ces quatre types d'enregistrements sont représentatifs de tous les régimes d'ensembles de signaux observés. La présente étude concerne les deux derniers de ces régimes bien que quelques évanouissements au-dessous du niveau moyen se fussent manifestés alors que le niveau des signaux était élevé, comme l'indique la figure 13(a). Une fois obtenus, les enregistrements étaient découpés en bandes correspondant à un intervalle de 24 heures. On reportait les renseigne-

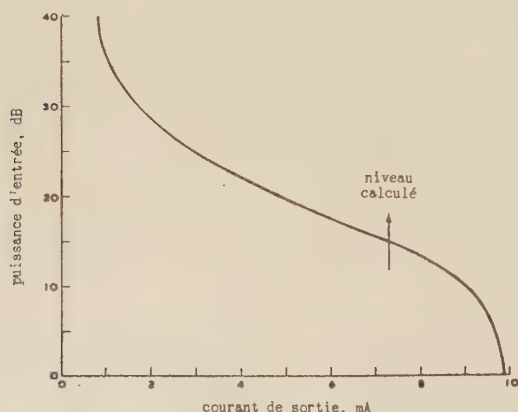


FIG. 12. — Courbe d'étalonnage du récepteur 3 cm.

venant de l'aérien du dispositif de contrôle du récepteur, et appliqué à ce dernier par l'intermédiaire de son antenne « fromage ». Cette caractéristique était une courbe donnant la puissance à l'entrée en fonc-

ments fournis par chaque bande sur un nouveau rouleau de la manière suivante :

on relevait sur le graphique original un nombre suffisant de valeurs instantanées pour reproduire la

centimétriques faites sur la côte Est des U. S. A., rédigé par BURROWS et ATWOOD [11], montre que le temps pendant lequel le niveau des signaux était à moins de ± 10 dB de leur niveau standard calculé

55

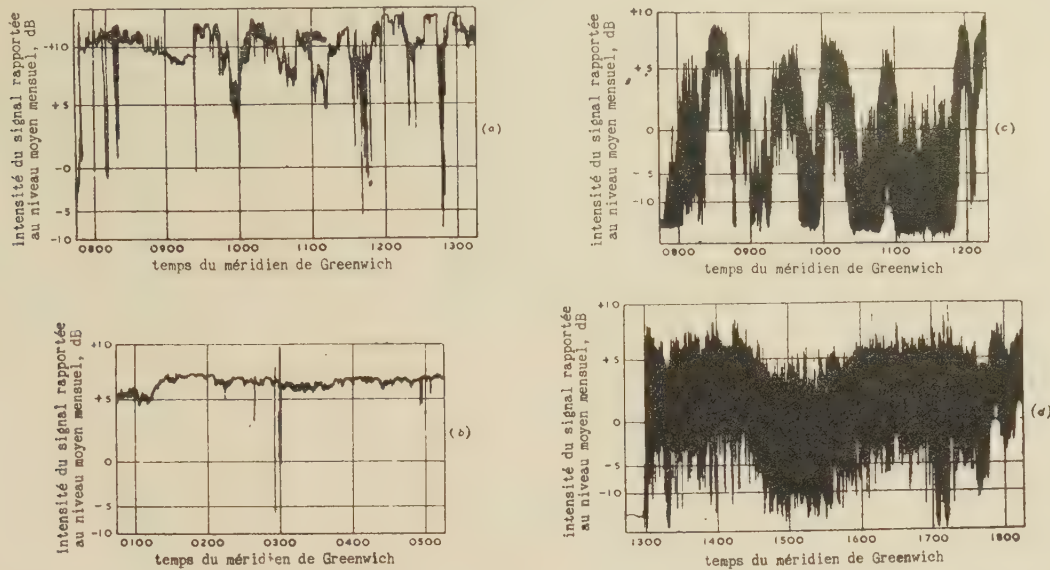


FIG. 13. — Types d'enregistrements du niveau du signal.

a) intense et variable ; b) moyennement intense et stable ; c) faible et variable ; d) faible avec fading marqué.

courbe donnant le niveau moyen des signaux. On graduait cette courbe en décibels par rapport au niveau moyen du mois, en effectuant la transformation d'unités de la manière habituelle à l'aide de l'étalonnage du récepteur. On traçait également sur le nouveau graphique les enveloppes inférieure et supérieure correspondant à l'amplitude du fading

ne dépassait pas respectivement 5 % et 10 % des durées de fonctionnement en été et en automne. D'après ces chiffres, il serait tout à fait trompeur d'utiliser le niveau calculé comme étalon de référence pour évaluer l'influence des fluctuations du niveau des signaux sur les portées utiles des équipements de radar. MILLARD et BYAM [13] se servent

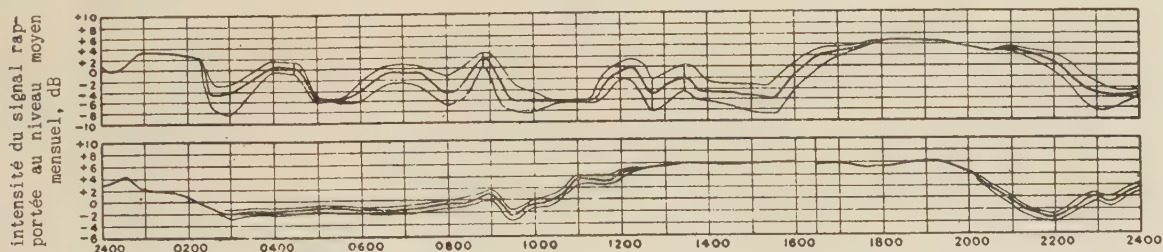


Fig. 14. — Type d'enveloppe de la profondeur du fading par rapport au niveau moyen du signal.

de part et d'autre du niveau du signal, comme le montre à titre d'exemple caractéristique la figure 14. Pour faciliter l'étude future des corrélations avec les observations météorologiques, on portait heure par heure sur un tableau les valeurs à l'instant considéré de l'intensité moyenne du signal, ainsi que l'amplitude correspondante du fading.

3.1.8. — Analyse des données.

Le niveau moyen mensuel servait de base de comparaison en vue de déterminer l'influence des fluctuations du niveau du signal sur la portée des divers équipements. On pensait, en opérant ainsi, définir un niveau standard plus conforme à la réalité qu'en utilisant à cet effet le niveau calculé. Un résumé d'une série d'expériences sur la propagation des ondes

d'un niveau moyen de signal déduit de résultats expérimentaux comme niveau de référence pour l'étude du fading dans le même but qu'ici.

En utilisant le niveau mensuel comme niveau de référence pour les fluctuations du signal, on peut évaluer convenablement les variations relatives de portée, mais on ne peut prévoir les portées absolues d'un équipement sans rapporter le niveau moyen mensuel au niveau calculé pour des conditions standard, puisqu'on doit utiliser ce chiffre comme base pour les calculs des portées absolues, tant qu'on ne dispose pas de données expérimentales beaucoup plus nombreuses sur les conditions de propagation. On a étudié séparément les données relatives à chaque mois, et on analysait les résultats des mesures radioélectriques en trois étapes comme ci-après.

a) On traçait une courbe « condensée » de l'intensité moyenne horaire du signal, et de l'amplitude moyenne horaire du fading, de manière à pouvoir évaluer facilement les variations d'ensemble des niveaux de signal et des caractéristiques du fading pendant tout un mois déterminé. La figure 15

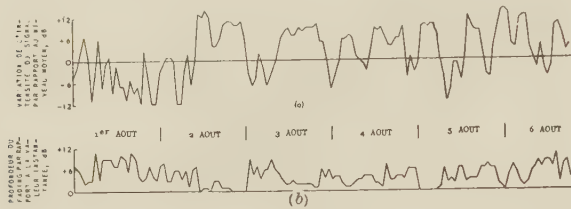


FIG. 15. — Extraits des graphiques des résultats d'août 1950. a) intensité moyenne du champ; b) profondeur du fading par rapport au niveau moyen.

représente l'aspect d'un graphique de ce genre pour les premiers jours d'août 1950. La courbe du haut représente les variations d'intensité des signaux de part et d'autre du niveau moyen pour le mois, la courbe du bas représente l'amplitude du fading à l'instant considéré, autrement dit, une amplitude du fading de $2y$ dB représente une fluctuation de $\pm y$ dB par rapport à la moyenne à tout instant.

b) On a établi des diagrammes mensuels de répartition des observations d'intensité de champ, qui sont représentés sur la figure 16. On a exprimé les

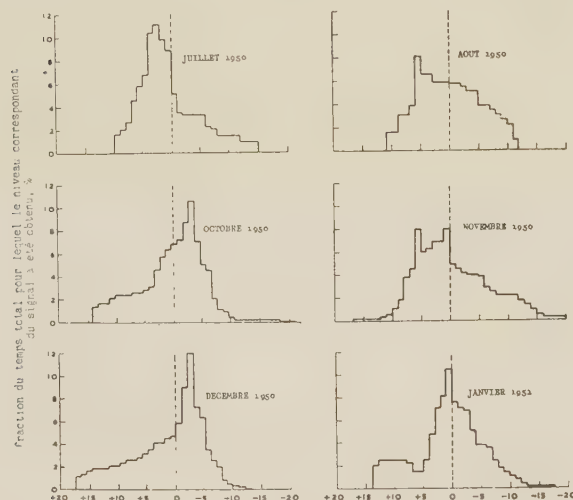


FIG. 16. — Distribution du niveau du signal par rapport au niveau moyen.

fréquences en pourcentage du temps total, la valeur des intervalles étant de 1 dB. On obtient ainsi la répartition des niveaux des signaux de part et d'autre du niveau moyen mensuel, avec une tolérance de ± 2 dB pour ce dernier. Chaque ordonnée représente le pourcentage du temps total pendant lequel on a observé le niveau de signal correspondant.

c) On a établi des diagrammes mensuels de répartition de l'intensité des évanouissements observés, représentés sur la figure 17, et sur lesquels on a porté les fréquences en pourcentage du temps total des diverses intensités de ces évanouissements.

L'étude des résultats expérimentaux a montré que le fading survient dans les conditions indiquées sur

le tableau n° 2 ci-dessous. On a supposé dans le calcul de l'intensité des signaux que le rayon terrestre efficace était égal au $4/3$ du rayon réel.

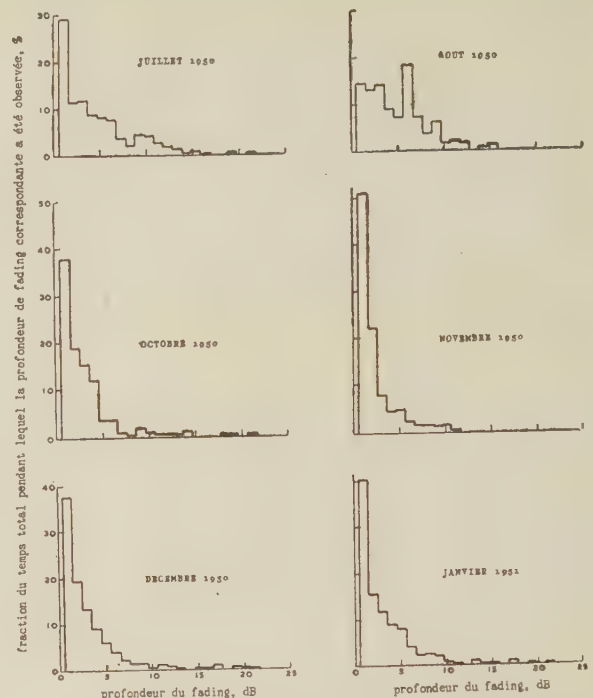


FIG. 17. — Graphiques mensuels des résultats.

TABLEAU II

Mois	TEMPS PENDANT LEQUEL LE NIVEAU DU SIGNAL MOYEN EST AU-DESSOUS DU NIVEAU STANDARD CALCULÉ
	%
Juillet, 1950	34
Août, 1950	43
Septembre, 1950	données insuffisantes
Octobre, 1950	45
Novembre, 1950	44
Décembre, 1950	43
Janvier, 1951	19

On peut, pour des applications pratiques, considérer ces pourcentages de répartition comme des pourcentages de probabilité d'un écart de niveau déterminé du signal par rapport au niveau calculé.

TABLEAU III

Mois	TEMPS PENDANT LEQUEL LA FLUCTUATION EST A MOINS DE ± 3 B DU NIVEAU MOYEN
	%
Juillet, 1950	77
Août, 1950	76
Septembre, 1950	données insuffisantes
Octobre, 1950	92
Novembre, 1950	93
Décembre, 1950	89
Janvier, 1951	89

Le tableau n° 3 indique les caractéristiques des fluctuations ou du fading à cadence rapide du signal ; on y voit que le niveau du signal est plus stable en hiver qu'en été. C'est en accord avec les résultats d'autres expérimentateurs [13, 17].

On a également étudié les caractéristiques du fading des signaux reçus pour mettre en évidence l'allure du phénomène en mesurant l'intensité et la durée des évanouissements. On a analysé, dans le tableau n° 4, les enregistrements de juillet 1950 à

TABEAU IV

INTENSITÉ DU FADING	TEMPS PENDANT LEQUEL SE PRODUIT LE FADING					
	< 1/4 h.	1/4 — 1/2 h.	1/2 — 1 h.	1 — 2 h.	> 2 h.	TOTAL
dB	%	%	%	%	%	%
Pendant juillet, 1950						
0- 5	1	4	3	1	2	11
5-10	1	2	3	2	1	9
10-15	0	1	2	3	4	10
Pendant août, 1950						
0- 5	2	3	4	5	0	14
5-10	2	3	5	4	2	16
10-15	0	2	3	4	3	12
Pendant octobre, 1950						
0- 5	2	4	6	3	16	31
5-10	1	3	2	4	3	13
10-15	0	1	1	3	2	7
Pendant novembre, 1950						
0- 5	2	3	4	4	7	20
5-10	2	3	4	4	1	10
10-15	0	1	2	3	4	10
Pendant décembre, 1950						
0- 5	0	2	3	3	16	24
5-10	0	1	2	3	13	19
10-15	0	0	0	1	0	1
Pendant janvier, 1951						
0- 5	0	2	3	4	7	16
5-10	0	1	3	4	7	15
10-15	0	1	1	3	3	8

janvier 1951, et l'on a indiqué le pourcentage du temps total correspondant à l'apparition du fading à trois niveaux différents au-dessous du niveau moyen mensuel, pour plusieurs durées différentes.

Les évanouissements de longue durée sont les plus importants pour les applications pratiques, et le tableau n° 4 montre que les évanouissements durant plus d'une heure sont plus fréquents en hiver qu'en été, et se produisent en hiver pendant plus de 50 % de la durée totale du fading correspondant à cette saison.

On a étudié avec soin les conditions météorologiques et les chiffres relatifs au fading pour voir s'il existait des corrélations entre les conditions météorologiques les plus faciles à observer et le fading

mesuré, mais on n'en trouva aucune. Les périodes prolongées de signal de faible niveau étaient souvent, mais pas toujours, accompagnées de bruite ou de léger brouillard, et le taux de corrélation de ces deux facteurs était faible. On a cru qu'il existait une corrélation entre le fading et l'état hygrométrique, mais une étude statistique a montré que le taux de corrélation était faible. Il semble donc qu'on ne puisse prévoir à coup sûr l'allure du fading d'après des observations météorologiques simples.

3.1.9. — Influence du fading mesuré sur la portée.

Des expériences faites par MILWRIGHT [14] et d'autres [15] ont montré que la portée d'un radar est proportionnelle à la puissance 1/8 de la puissance de l'émetteur dans la partie extérieure (ou « région éloignée ») de la zone en deçà de l'horizon radioélectrique, et à la puissance 1/4 de la « région proche » comme on peut le prévoir d'après les lois de propagation dans l'espace indéfini. Dans la région éloignée en deçà de l'horizon radioélectrique, la relation entre la distance *R* et la puissance *P* reçue par le récepteur, dans un trajet aller simple (radar-balise) est du type $P = K \cdot R^{-m}$, où *K* est une constante et *m* une fonction de *R* qui varie graduellement, partant d'une valeur faible au voisinage du dernier maximum de la courbe d'interférences pour atteindre une valeur élevée au voisinage de l'horizon radioélectrique. On admet que la relation moyenne dans la région éloignée est telle que l'énergie reçue, émanant de la balise, est inversement proportionnelle à la huitième puissance de la distance, et on a utilisé cette relation en vue de calculer l'influence du fading sur la portée utile des radars et des balises. On s'attendrait, naturellement, à une relation différente mais, en général, la portée maximum des radars est un peu inférieure à la distance à laquelle apparaît le dernier maximum de la courbe d'interférences, tandis que la portée maximum des balises atteint en général, ou même dépasse légèrement, l'horizon radioélectrique. La pente de la courbe (intensité du champ-distance) est plus grande au voisinage de la portée optique qu'au voisinage du dernier maximum et, par conséquent, pour les parties de la région éloignée utilisées respectivement par un radar et une balise, on observe que la loi de la huitième puissance est valable, dans le cas du radar, dans un court intervalle seulement, tandis que la loi relative à la balise a été prise comme moyenne sur une portion beaucoup plus grande de la courbe, dans laquelle *m* varie de zéro pour le dernier maximum à 16 au voisinage de l'horizon radioélectrique.

L'utilisation de l'hypothèse de la loi de la huitième puissance, et celle des résultats expérimentaux relatifs au fading mesurés à mi-distance de l'horizon radioélectrique en vue du calcul de l'influence du fading sur les portées des balises au voisinage de cet horizon entraînent deux erreurs qui tendent à se compenser. On sait que l'exposant de la loi de trans-

mission est supérieur à huit au voisinage de l'horizon radioélectrique ; il est aussi, en général, exact que le fading est plus intense au voisinage de l'horizon radioélectrique qu'à mi-distance de ce dernier. Ainsi, l'utilisation de chiffres trop faibles pour l'intensité du fading, combinée avec une loi de décroissance trop lente en fonction de la distance, conduira à une estimation de la diminution de la portée des balises qui sera probablement très raisonnable pour toute la région éloignée en deçà de l'horizon radioélectrique. Les mesures ci-dessus ont été faites à une distance égale à 57 % de celle de l'horizon radioélectrique, et on pense que les calculs de variation de portée en deçà de l'horizon radioélectrique prenant pour base ces mesures d'affaiblissement seront assez corrects, l'erreur étant maximum à la distance la plus grande. Des expériences de MILWRIGHT [14]

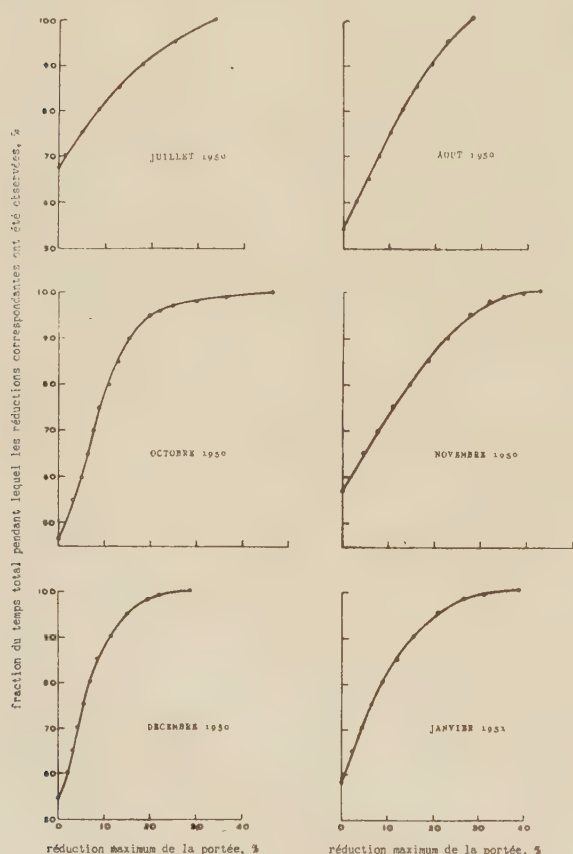


FIG. 18. — L'effet du fading sur les portées des balises radar et les matériels similaires.

ont montré que, dans le cas du radar, la loi de la huitième puissance est en général valable dans la moitié extérieure de la portée totale de l'équipement. et même, dans certains cas, également en deçà de cette moitié. Puisqu'on a établi les courbes de la figure 18 à l'aide des conditions de propagation dans la région éloignée, on peut s'en servir avec une précision satisfaisante dans le cas où la portée maximum est réduite d'une quantité comprise entre 0 et 50 à 60 %. Si la réduction est plus importante, les lois correspondant à une puissance inférieure de la région rapprochée deviennent valables, et ne sont pas représentées sur la figure 18. On peut voir, d'après la figure 18, que l'influence du fading sur la portée était maximum en juillet et août 1950, période au cours de laquelle, pendant 90 % du temps, la diminution maximum de portée était de 20 %. En hiver, la réduction maximum de portée, pendant 90 % du temps, était en général de 12 à 15 %, sauf en novembre 1950, où elle fut de 23 %. Ces résultats indiquent que la réduction de portée occasionnée par le fading dans les eaux côtières britanniques n'est, dans l'ensemble, pas très importante, bien que de fortes diminutions (de l'ordre de 40 %) puissent se manifester de temps en temps. On doit cependant les considérer comme exceptionnelles, puisqu'on ne les a observées que pendant 1 % du temps.

3.1.10. — Évaluation de la puissance nécessaire au fonctionnement des balises-radar.

Pour déterminer par le calcul la puissance nécessaire au fonctionnement satisfaisant d'une balise radar dans des conditions bien définies, y compris l'affaiblissement dû au fading, il est nécessaire de rapporter l'intensité du fading au niveau du signal calculé en utilisant un rayon terrestre égal aux $4/3$ du rayon réel, et non au niveau moyen mensuel, puisque cette méthode de calcul s'appuie sur une base théorique [16]. C'est ce qu'on a fait dans le tableau n° 5, la différence entre la moyenne mensuelle et les niveaux calculés étant connue dans chaque cas. MILWRIGHT [14] a mesuré la puissance minimum détectable par un récepteur radar sur 3 cm en tenant compte des pertes dans les guides d'ondes, etc, et a trouvé $2,45 \cdot 10^{-11}$ W. On a calculé, en se basant sur un gain de l'aérien de 30 dB par

TABLEAU V

MAXIMUM DE L'INTENSITÉ DU FADING	PUISSANCE DES FAISCEAUX NÉCESSAIRE POUR CRÉER UN CHAMP DE $340 \mu\text{V/m}$ A L'HORIZON RADIOÉLECTRIQUE	TEMPS PENDANT LESQUELS LE FADING NE DÉPASSE PAS LES VALEURS DONNÉES COLONNE 1					
		JUILLET 1950	AOUT 1950	OCTOBRE 1950	NOVEMBRE 1950	DÉCEMBRE 1950	JANVIER 1950
dB	watts	%	%	%	%	%	%
0	100	30	30	62	47	58	81
5	300	73	60	94	71	93	95
10	1 000	88	85	100	88	100	100
15	3 000	96	100		100		

rapport à un radiateur isotrope (cas d'une antenne « fromage » d'ouverture $5' \times 3''$ ou $152,4 \text{ cm} \times 7,52 \text{ cm}$), les « puissances des faisceaux » nécessaires pour créer un champ de $340 \mu/\text{Vm}$ à la limite de portée optique d'une balise pour divers intensités du fading, et on les a indiquées sur le tableau n° 5. Les chiffres relatifs au temps correspondent aux durées pendant lesquelles le fading ne dépasse pas les valeurs indiquées.

Par définition, la « puissance d'un faisceau » est la puissance HF fournie par le tube multipliée par le gain de l'aérien par rapport à un radiateur isotrope. Les puissances des faisceaux ont été arrondies au multiple de 10 W le plus proche, puisque les chiffres donnés ne sont que des évaluations et que la précision du calcul n'est pas très élevée. Pour déterminer la puissance nécessaire pour atteindre l'horizon radioélectrique — qui est la portée la plus logique à considérer, puisque la puissance nécessaire est à peu près indépendante des hauteurs des aériens et de la distance absolue — on a utilisé les valeurs de fading mesurées à une distance égale à 57 % de celle de l'horizon radioélectrique. Les valeurs des puissances calculées sont ainsi probablement quelque peu optimistes puisque, en général, le fading est plus intense à l'horizon radioélectrique qu'en deçà. Toutefois, cette erreur n'est pas importante au point de vue pratique parce que, à cause de l'accroissement rapide de l'affaiblissement avec la distance au voisinage de l'horizon radioélectrique, 2,2 dB/km, la réduction réelle de portée par rapport à la valeur calculée due à cette erreur serait faible.

Pour calculer de manière plus précise la puissance nécessaire à un émetteur de balise pour assurer un service satisfaisant jusqu'à l'horizon radioélectrique et même au-delà, il faut mesurer le fading sur une distance légèrement supérieure à celle de l'horizon radioélectrique, puisque l'emploi des valeurs du fading mesurées à 57 % de la distance de l'horizon radioélectrique ne paraît pas justifiable, en toute rigueur, pour déterminer la puissance nécessaire en vue d'atteindre l'horizon radioélectrique. On se propose d'effectuer ultérieurement des mesures de ce genre, mais les chiffres ci-dessus constitueront une première approximation pour les applications actuellement envisagées.

Les variations du niveau de signal mesurées par RANDALL COOK [18] à l'horizon radioélectrique pendant une très courte période étaient du même ordre de grandeur que celles mesurées par mes soins sur le parcours fixe Eastney-Selsey, mais on pense que cet accord peut être dû à une coïncidence.

3.1.11. — Résultats obtenus par d'autres expérimentateurs.

DURKEE [17] ainsi que MILLER et BYAM [13] ont fait des observations au sujet du fading sur les distances ne dépassant pas l'horizon radioélectrique au-dessus de la terre ferme, entre New-York et Neshanic, éloignées de 64 kilomètres. Étant donné que, les buts de ces chercheurs étaient assez diffé-

rents des nôtres, les méthodes d'étude et de présentation des résultats diffèrent, ce qui rend les comparaisons directes des résultats plutôt difficiles ; cependant les deux groupes d'expériences citées ci-dessus, ont montré que le fading était minimum en hiver et maximum en été. Les conditions expérimentales étaient tout à fait différentes de celles faisant l'objet du présent travail.

Nos mesures concernaient un trajet de 16 kilomètres au-dessus de la mer, le littoral étant très voisin du parcours des ondes, tandis que les mesures américaines correspondaient à un parcours entièrement terrestre sur 64 kilomètres. Il est à noter que le niveau de signal mesuré par MILLER et BYAM [13] était inférieur au niveau calculé pendant un pourcentage considérable du temps (plus de 90 % en hiver et de 40 % en été) et qu'ils ont utilisé le niveau moyen de leurs résultats comme référence pour définir l'intensité du fading.

On ne donnera pas ici plus de détails sur les résultats, parce qu'on pourrait être conduit à des conclusions erronées si on les appliquait à l'objet de la présente étude, du fait de la différence des conditions expérimentales.

Un travail semblable poursuivi en France [27, 29, 30] par CHAVANCE et d'autres auteurs montre une variation saisonnière du fading concordant avec les résultats de la présente étude. KLEIN et LIBOIS [29] apportent une preuve intéressante et en accord avec ces résultats, et VOGÉ [30] démontre l'influence des facteurs météorologiques sur la propagation.

3.1.12. — Conclusions.

À part des renseignements détaillés sur les caractéristiques du fading, on peut tirer trois conclusions d'ordre général de la présente étude. On a procédé à une évaluation — qu'on doit considérer comme, une première approximation — de la puissance nécessaire au fonctionnement sûr d'un émetteur de balise sur 3 cm pour diverses intensités du fading. On a associé les diverses intensités des évanouissements avec des chiffres de pourcentage en temps de leur fréquence pour des conditions-types d'été et d'hiver dans les eaux côtières britanniques.

On a évalué l'influence du fading sur les portées maximum des radars et des balises radar. On a présenté les résultats correspondants sous forme de courbes donnant le pourcentage de réduction de la portée maximum en fonction du pourcentage du temps pour une période de six mois représentatifs des conditions-types d'été et d'hiver. En général, la diminution de la portée n'est pas très importante, les réductions de portée n'étant pas supérieures à 20 % pendant environ 90 % du temps. Cependant, ces chiffres varient beaucoup quand la portée part d'une distance inférieure à la distance D_H de l'horizon radioélectrique à une distance supérieure à D_H . Pour une propagation à une distance égale ou supérieure à D_H , la réduction de portée pour un affaiblissement donné dû au fading est beaucoup moindre

que pour une propagation à une distance inférieure à D_H . On a admis, pour ce calcul, des conditions « moyennes ».

On n'a pas observé de corrélation appréciable entre le fading et des conditions météorologiques faciles à déterminer, comme le type de temps, les différences de température, et l'état hygrométrique. On pense que ce résultat, bien que négatif, peut intéresser les utilisateurs pratiques de radars et de balises.

On a étudié les caractéristiques du fading en fonction de son intensité et de la durée des évanouissements. On a porté ces résultats sur le tableau n° 4, sur lequel on peut voir qu'il y a une différence marquée entre les caractéristiques du fading en été et en hiver. Pendant l'été, les intensités du fading se répartissent également entre les valeurs considérées, à savoir 5, 10 et 15 dB, et les durées assez également entre des périodes de 15 à 120 mn. Au cours de l'hiver, la majorité des évanouissements sont de faible intensité (0 à 5 dB) et de longue durée (supérieure à 2 h.). D'après ceci, il est manifeste que le niveau du signal est beaucoup plus stable et varie plus lentement l'hiver que l'été, ce qui tient probablement à la rareté relative des guides atmosphériques en hiver, quand la basse atmosphère est bien mélangée et peu stratifiée.

Ces résultats ont une grande importance pratique et signifient que l'effet le plus fréquent du fading sur la portée d'un équipement en hiver sera une réduction de portée ne dépassant pas 14 % environ, qui, cependant, pourra persister pendant de très longues périodes, tandis qu'en été, on pourra observer des diminutions de portée atteignant 35 %, mais de durée moindre.

La scintillation du signal était, de même, moins prononcée en hiver qu'en été.

3.2. — Mesures de quelques caractéristiques de la propagation sur les lignes de Goubau dans la bande de 3 cm.

On sait depuis longtemps qu'il existe des modes de propagation non rayonnants le long d'un seul fil métallique de diamètre petit par rapport à la longueur d'onde. SOMMERFIELD [19] a décrit en 1899 ce type de propagation d'ondes sur un fil unique de conductibilité finie, et STRATTON [20] a également étudié et analysé la question de la propagation des ondes le long de cylindres métalliques et diélectriques.

Dans le cas considéré ici de la propagation d'ondes guidées sur un cylindre métallique, l'étude du problème montre que, bien que les solutions de l'équation de propagation donnent naissance à une infinité de modes TE et TM, symétriques ou assymétriques, un seul de ces modes (le mode transversal magnétique TM_{01} ou H_{01}) présente un intérêt pratique, car tous les autres ont un affaiblissement si élevé qu'ils s'amortissent très rapidement après avoir été excités. Ce type de propagation correspond donc à un mode unique ; il diffère donc de la propa-

gation dans les guides d'ondes métalliques creux, dans lequel les modes les plus élevés ne sont pas fortement amortis et peuvent, comme c'est fréquemment le cas, avoir, du fait de leur présence, des conséquences gênantes.

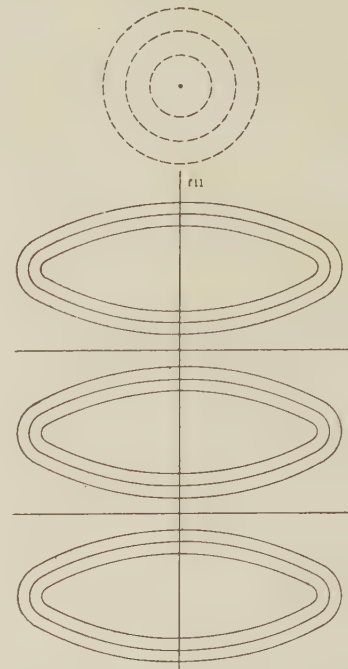


FIG. 19. — Configuration des champs dans le mode TM_{01} ; — lignes de champ électrique, — — — lignes de champ magnétique.

La figure 19 représente l'allure du champ du mode TM_{01} (ou H_{01}) sur un fil métallique unique. Les lignes de force magnétiques sont des cercles concentriques centrés sur le fil, et les lignes de force électriques vont des groupes de charges positives aux groupes de charges négatives le long du fil.

3.2.1. — Excitation du mode TM_{01} .

Il faut, pour exciter ce mode sur un fil, disposer d'un transformateur qui transforme la configuration

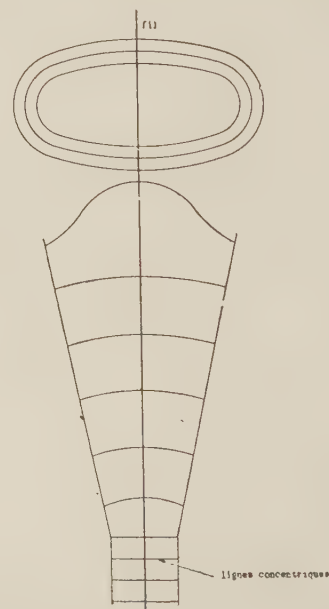


FIG. 20. — Cornet conique avec dispositif de transition graduelle ; — ligne de champ électrique.

du champ magnétique d'un guide d'onde ou d'un coaxial en celle du mode TM_{01} sur fil. On peut le réaliser sous la forme d'un cornet conique qui est la continuation du conducteur extérieur d'une ligne coaxiale ; le conducteur intérieur traverse le cornet et constitue le fil de transmission. L'ensemble est représenté figure 20, les lignes de force électriques étant en pointillé. Les problèmes de l'émission de ce mode de vibration avec un bon rendement, et les meilleurs moyens d'y parvenir ont été étudiés en détail par DYOTT [21].

3.2.2. — Affaiblissement.

L'affaiblissement de ce mode est très faible, et dépend de f/a , tandis que l'étendue du champ dépend de a/f (f = fréquence, a = rayon du fil). Pour une fréquence de 10 000 MHz et un fil de 1 mm de rayon, l'affaiblissement est de 0,049 dB/m, environ 50 % de moins que l'atténuation (0,095 dB/m) d'un guide d'onde à la même fréquence.

Pour des longueurs d'onde de l'ordre de 70 cm (420 MHz) l'affaiblissement de la ligne à un fil est bien inférieur à celui d'un bon câble coaxial, les valeurs représentatives, à 400 MHz, étant 0,0072 dB/m pour un fil de 1 mm de rayon, et 0,2 dB/m pour un bon coaxial.

Malheureusement, bien que l'atténuation des ondes guidées sur un fil de cuivre soit faible, l'étendue radiale du champ, à partir du fil, est considérable. Cela signifie que le dispositif d'excitation, quelque soit son type, devra être grand, et, pratiquement, le fil doit être maintenu à distance des obstacles susceptibles d'absorber l'énergie transmise par lui. Il en résulte qu'au début de la mise en pratique de la théorie, on n'employa pas de fil nu, car on n'avait pas proposé de dispositif d'excitation approprié jusqu'à ce que GOUBAU introduisit le dispositif d'émission à cornet.

Ce problème a été reconsidéré récemment par GOUBAU [22, 23], qui a montré que si l'on modifie de façon quelconque la surface du fil de manière à réduire la vitesse de phase de l'onde guidée (par exemple en y taillant un filetage ou en le recouvrant d'une couche mince de diélectrique), on réduit considérablement l'étendue du champ radial, et la propagation se concentre au voisinage du fil. GOUBAU a également établi les nombreuses relations nécessaires pour calculer l'affaiblissement et l'étendue du champ de fils recouverts de diélectrique, et les chiffres théoriques cités dans le présent travail sont basés sur ses travaux. Ces travaux ont été continués et développés en France par CHAVANCE et CHIRON [31], COLIN [32] et FROMAGEOT et LOUIS [33].

La réduction de l'étendue du champ provoquée par l'application d'une couche de diélectrique sur le fil entraîne une augmentation de l'atténuation par rapport à celle du fil nu ; elle provient des pertes supplémentaires dans le diélectrique et d'un accroissement des pertes dans le cuivre.

3.2.3. — Angles et coudes.

Un des principaux inconvénients de la transmis-

sion sur fil unique est constitué par les pertes par rayonnements élevés, qui se produisent aux angles et aux coudes ; ces pertes varient en raison inverse du rayon de courbure.

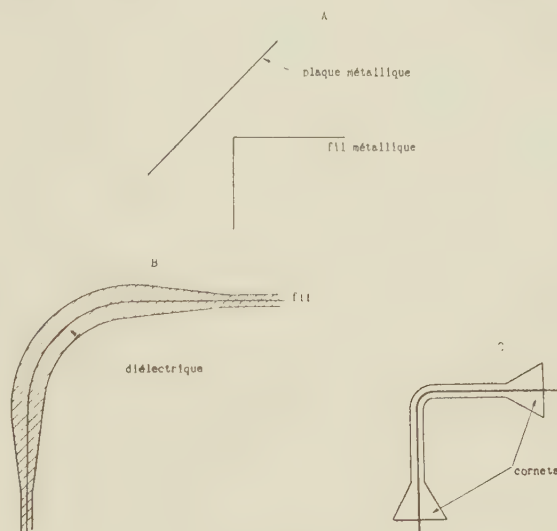


FIG. 21. — Types de coudes.

On a étudié divers modèles d'angles et de coudes, et la figure 21 en représente qui peuvent être plus satisfaisantes qu'une simple courbure du fil. Le type (a) comporte un panneau réflecteur à 45° du fil, tandis que, dans le type (b), on augmente l'épaisseur du diélectrique de manière à améliorer le guidage de l'onde le long du coude, en diminuant ainsi le rayonnement ; le type (c) utilise le dispositif émetteur normal pour transformer l'onde TM_{01} en un mode TEM coaxial, puis réémettre l'onde TM_{01} à la fin du coude. Ce dernier modèle donne des résultats satisfaisants, et les pertes sont minima. Ce problème relatif aux ondes guidées a été étudié ailleurs, et fera l'objet d'une publication ultérieure.

3.2.4. — Objet.

On expose ci-après quelques résultats d'expériences de propagation d'ondes de 3 cm guidées sur fil. L'ensemble correspondant à cette longueur d'onde diffère à certains points de vue de celui utilisé par GOUBAU, en ondes décimétriques. On a mesuré les affaiblissements de divers fils, et étudié les propriétés de diverses charges, fictives et supports de fil. On a également noté l'influence de la pluie et des conditions météorologiques en général sur les pertes d'une ligne de 55 m environ en fil émaillé.

3.2.5. — Mesures d'affaiblissement.

Comme l'affaiblissement des 2 ou 3 mètres de ligne de transmission à un seul fil, qu'on pouvait placer commodément à l'intérieur d'un laboratoire, était très faible (de l'ordre de 0,1 dB), les méthodes de mesure par substitution étaient insuffisamment précises pour être utilisées, du fait principalement de la difficulté de réaliser une très bonne adaptation. On mesura par suite les pertes par atténuation de la ligne, à l'exclusion des pertes dues au dispositif d'émission, par une méthode d'ondes stationnaires.

La figure 22 représente le dispositif expérimental. La ligne aboutissait à une plaque métallique plane de 10 dm² environ à travers laquelle le fil passait et à laquelle il était soudé. Le montage fut fait avec soin, afin que le fil fût rigoureusement normal à la plaque. Le mode était excité par le cornet placé à l'autre extrémité du fil, et on mesurait le taux d'ondes stationnaires en tension (t. o. s. t.) en deux points respectivement voisins de la plaque et du cornet.

lèlement au dit fil. On y parvenait facilement avec des fils fins, mais les fils assez gros de diamètre 3,26 mm exigeaient une tension très forte.

Les résultats expérimentaux sont tous supérieurs, de 10 %, au maximum, aux chiffres calculés d'après les valeurs admises de la constante diélectrique et de la tangente de l'angle de pertes des couches diélectriques. Le tableau n° 6 indique quelques résultats. On admit une constante diélectrique (ϵ) de 3, et une tangente d'angle de pertes ($\text{tg } \delta$)

TABLEAU VI

FIL DE CUIVRE TAILLE (S. W. G.)	DIÉLECTRIQUE	ÉPAISSEUR RADIALE DU DIÉLECTRIQUE (cm)	ATTÉNUATION CALCULÉE (dB/m)	ATTÉNUATION MESURÉE (dB/m)
20	Émail à base d'huile	0,003	0,184	0,193
18	Polythène	0,047	0,309	0,353
14	Émail à base d'huile	0,005	0,116	0,123
10	Émail « Lewmex »	0,005	0,074	0,072
10	Fibre de verre imprégnée	0,028		0,278
	Fibre			

On effectuait les mesures de t. o. s. t., du côté « émetteur » de la ligne, à une distance d'environ 10λ du cornet, de telle sorte que le champ était exclusivement celui du mode TM_{01} , et exempt des irrégularités résultant de la proximité du cornet émetteur.

La relation entre le t. o. s. t. (r) et l'affaiblissement (α) de la ligne est :

$$\alpha = \frac{10}{l} \cdot \log_{10} \frac{r+1}{r-1} \text{ dB/m,}$$

l étant la longueur de la ligne.

Cependant, l'affaiblissement (α_A) calculé à partir de r_A (le t. o. s. t. mesuré au point A du fil) peut comprendre une perte additionnelle due à l'absorption ou à la diffusion de la plaque réfléchissante ; il en résulte qu'on peut écrire α_A sous la forme :

$$\alpha_A = \alpha l_1 - \alpha_0$$

l_1 étant la longueur de ligne entre le point A et la plaque, α_0 la perte par réflexion due à la plaque, et α la constante d'atténuation de la ligne.

On peut de même exprimer α_B (l'affaiblissement calculé au point B) par :

$$\alpha_B = \alpha l_2 + \alpha_0$$

où l_2 = longueur de ligne entre B et la plaque. On en tire $\alpha_A - \alpha_B = \alpha(l_1 - l_2)$ d'où la constante d'atténuation $\alpha = (\alpha_A - \alpha_B)/(l_1 - l_2)$.

On mesurait le taux d'ondes stationnaires à l'aide d'une sonde mobile se déplaçant parallèlement au fil et débitant sur un cristal, dont on appliquait la tension de sortie à un amplificateur sélectif amplifiant la tension de modulation de l'onde émise. On mesurait d'abord les t. o. s. élevés en décibels à partir des indications de l'amplificateur, puis on les transformait ensuite en rapport de tension.

Il est essentiel que le fil soit parfaitement rectiligne (sans coudes), et que la sonde se déplace paral-

de $8 \cdot 10^{-3}$ (d'après GOUBAU) pour l'émail ; les valeurs respectives de ϵ et de $\text{tg } \delta$ admises pour le polythène étaient respectivement de 2,5 et $1,6 \cdot 10^{-3}$. On a obtenu ces chiffres par des mesures à 10 000 MHz en utilisant les méthodes de ROBERTS et de VON HIPPEL [24], et ils doivent bien correspondre à la réalité.

3.2.6. — Charges adaptées.

On a observé qu'il était relativement simple de réaliser une charge adaptée convenant pour la plupart des mesures autres que celles exigeant un coefficient de réflexion extrêmement faible de la charge. On n'a pas essayé de mettre ou point une charge adaptée de ce dernier type.

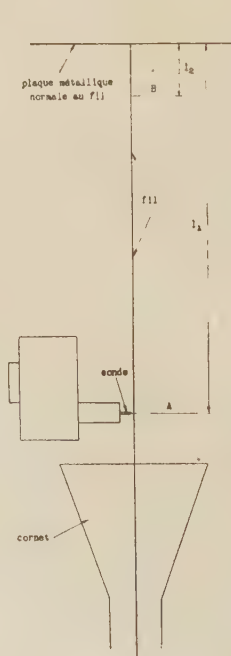


FIG. 22. — Méthode de mesure de l'atténuation.

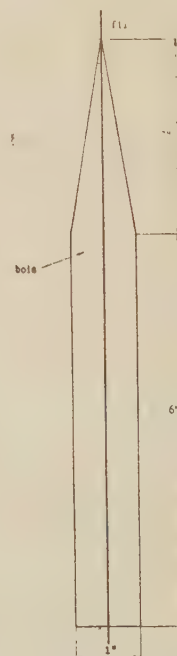


FIG. 23. — Terminaison adaptée en bois.

On a réalisé deux types de charges adaptées : un morceau cylindro-conique de bois tendre, de même axe que le fil (fig. 23) de diamètre maximum 25,4 mm sur un fil émaillé n° 10 SWG (3,25 mm de diamètre) donna lieu à un t. o. s. t. de 0,92. Un morceau de carton résistant (recouvert de carbone) dit « morganite », (152 × 50 mm) en contact avec le fil par son petit côté, son grand côté étant parallèle à l'axe donna lieu à un t. o. s. t. de 0,95 avec un fil émaillé n° 10 S. W. G.

3.2.7. — Supports de fil.

On utilisait, pour maintenir le fil rigidement, un disque de polystyrène d'épaisseur λ_p , où λ_p était la longueur d'onde dans le diélectrique. Le diamètre de ce disque était de 76,2 mm pour du fil émaillé 10 S. W. G., et choisi de manière que l'intensité du champ sur son pourtour soit très petite par rapport à celle à la surface du fil. En utilisant comme terminaison la charge adaptée constituée par le cylindre de bois de 25 mm de diamètre placée en arrière de ce disque, le t. o. s. t. mesuré était de 0,96 ce qui indiquait que pour toutes les applications n'exigeant pas une extrême précision et un coefficient de réflexion très faible, le disque de polystyrène donnait des résultats suffisants.

Le disque diélectrique était fixé à l'intérieur d'une bague en laiton elle-même fixée à une colonne en laiton à placer verticalement sur un banc.

3.2.8. — Étendue du champ.

On a tracé la distribution du champ le long d'un rayon, à partir de la surface du fil, pour divers diamètres et revêtements diélectriques du fil, en utilisant, comme ci-dessus, une petite sonde se déplaçant dans une direction normale au fil. La figure 24 représente une courbe type pour un fil n° 18 SWG ($\varnothing = 1,22$ mm) recouvert de polythène : l'affaiblissement en dB devient, à partir d'un certain point, proportionnel au logarithme de la distance. La première partie de la courbe est probablement déformée du fait de l'énergie diffusée par la sonde. Le champ électrique E_r radial du fil dans le mode TM_{01} est proportionnel à une fonction de HANKEL [25], c'est-

à-dire que $E_r = C \times H_1^{(1)}(kr)$, où k et C sont des constantes, et r la distance radiale au fil. $H_1^{(1)}(kr)$ varie comme $1/r$ pour r petit, d'après le développement au voisinage de zéro de cette fonction de HANKEL, si bien qu'on pourrait penser que le champ radial diminue comme $1/r$ au voisinage du fil, et exponentiellement aux plus grandes distances. La figure 24 permet d'évaluer la rapidité de la diminution à partir du fil, puisqu'une mesure à 4 cm de sa surface indique un affaiblissement de 40 dB au-dessous de sa valeur sur ladite surface ; cet affaiblissement doit être, en fait, beaucoup plus élevé, mais le phénomène de diffusion signalé rend très imprécises les mesures de champ au voisinage de la surface du fil.

3.2.9. — Action des intempéries sur une ligne de transmission à fil unique à l'air libre.

On a tendu une ligne de 55 m en fil émaillé n° 10 SWG (3,26 mm de diamètre) à l'extérieur du laboratoire. Ce fil était soutenu par des disques diélectriques du type décrit ci-dessus, en son milieu, et au voisinage de chaque extrémité, où il traversait les murs en bois de deux bâtiments.

L'émetteur était modulé par des ondes rectangulaires à la fréquence de 1 250 Hz, et le récepteur était un détecteur à cristal suivi d'un amplificateur sélectif, accordé sur 1 250 Hz, qui débitait sur une voie d'un milliampèremètre enregistreur à double plume. L'autre voie de l'enregistreur recevait les signaux de sortie d'un amplificateur semblable, attaqué par un ensemble de contrôle constitué par un cristal et une sonde placée dans le système de guides d'ondes de l'émetteur. On avait placé un atténuateur HF étalonné dans les guides d'ondes de l'émetteur ; il servait à étalonner simultanément l'enregistreur de la ligne de transmission à fil unique et celui de contrôle. On fit fonctionner cet équipement, et on observa deux faits très importants, indiquant tous deux l'importance de l'eau déposée sur le fil au point de vue des pertes de la transmission. Les jours ensoleillés où il ne pleuvait pas, la courbe d'affaiblissement présentait une variation diurne régulière : l'affaiblissement était minimum après midi, quand la chaleur du soleil était maximum et le fil sec. Tard dans l'après-midi, l'affaiblissement augmentait de 3 dB environ, quand une condensation se produisait sur le fil et les disques-supports diélectriques. La valeur de l'affaiblissement restait constante jusqu'au lever du soleil suivant, puis on observait une diminution relativement rapide entre 8 h et 12 h. On a représenté cette variation pour deux journées caractéristiques (25 et 26 octobre 1950), sur la figure 25. Les chiffres en décibels sont en valeur relative et non en valeur absolue pour l'ensemble. A cette époque, les jours étaient sans nuages et ensoleillés. Il est probable que cette courbe aurait une allure semblable en été, les périodes d'atténuation minimum étant plus longues du fait du nombre plus élevé d'heures d'ensoleillement.

L'action de la pluie sur l'affaiblissement de la

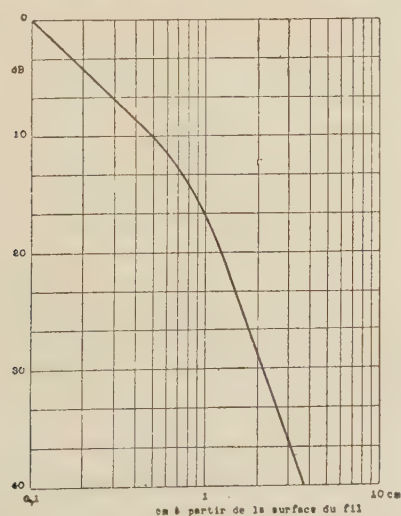


FIG. 24. — Distribution radiale du champ.

transmission est très nette, et la figure 26 la représente pour la période comprise entre le 3 octobre et le 1^{er} novembre 1950. Au point A, la pluie commença

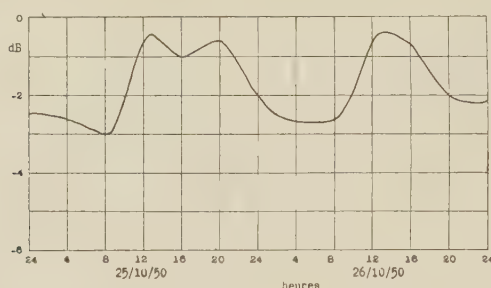


FIG. 25. — Effet de l'humidité sur l'atténuation. Type de variation diurne.

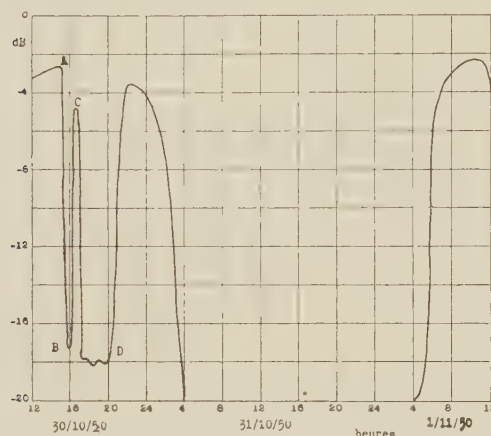


FIG. 26. — Effet de la pluie sur l'atténuation.

à tomber et l'affaiblissement augmenta brusquement d'environ 13 dB. Au point B, la pluie cessa, et les petites gouttes sur le fil disparurent, ce qui provoqua une diminution très rapide de l'affaiblissement quand le fil sécha pendant une courte période d'ensoleillement. Au point C la pluie tomba de nouveau en abondance, et l'atténuation augmenta immédiatement d'environ 12 dB, et se maintint à ce taux pendant plusieurs heures, jusqu'à ce que le temps s'éclaircît au point D. L'affaiblissement diminua alors pendant la nuit jusqu'à l'apparition d'un brouillard épais au début de la matinée du 31 octobre. De grosses gouttes d'eau se formèrent sur le fil et l'affaiblissement augmenta jusqu'à dépasser 20 dB, limite d'étalonnage de l'équipement. Cet état de chose dura toute la journée du 31 octobre, l'atténuation restant très élevée jusqu'à minuit lorsque le brouillard se leva et qu'un léger vent provoqua la chute des gouttes déposées sur le fil. L'affaiblissement diminua alors très vite jusqu'à son niveau primitif, où il se maintint, à part une augmentation et une diminution brusques provoquées par une seule averse le 1^{er} novembre à midi.

La forte augmentation de l'affaiblissement provoquée par l'humidité sur cette ligne de 55 mètres provenait presque exclusivement de l'eau déposée sur le fil, et non de celle déposée sur les disques-supports diélectriques, ce qu'on vérifia en essuyant les disques ; on observa une diminution de l'affaiblissement de l'ordre de 1,5 dB seulement. On fit disparaître les grosses gouttes sur les trois quarts de

la ligne, et on n'observa qu'une très faible réduction (3 dB) de l'atténuation, ce qui signifie que la pellicule d'eau laissée sur le fil était un facteur d'affaiblissement très important. Un autre travail a indiqué que l'atténuation provoquée par l'humidité est inversement proportionnelle à la fréquence. On a observé que l'influence de l'humidité était beaucoup plus faible à 3 000 MHz, et beaucoup plus forte au-delà de 10 000 MHz.

3.2.10. — Conclusions.

Bien que la transmission par ondes guidées sur fil présente de nombreux avantages, comparée à celle par guides d'ondes, pour la transmission d'énergie, son emploi à 10 000 MHz est très limité du fait de la très forte augmentation de l'affaiblissement provoquée par l'eau. Par rapport aux guides d'ondes les lignes de transmission sur fil simple ont, à 10 000 MHz, un affaiblissement du même ordre si le fil est sec, elles sont beaucoup moins coûteuses, d'un poids moindre, et leurs tolérances de fabrication sont assez larges pour ne pas donner lieu à des difficultés. Comme il n'existe pas de fréquence de coupure, ce dispositif laisse passer une bande de fréquences extrêmement large : c'est de plus une ligne de transmission à mode unique. D'autre part son emploi est obligatoirement limité aux régions sèches, et il faudra étudier de plus près les problèmes des angles et des coudes pour trouver une solution optimum, qui risque d'accroître le coût et la complication du système.

L'emploi des ondes guidées sur fil à des fréquences de l'ordre de quelques centaines de MHz pourrait cependant sembler avantageux, car cette fois l'influence de l'humidité serait faible, et les câbles coaxiaux pour ces fréquences ont à la fois des pertes considérables et un prix élevé. A 400 MHz, l'atténuation calculée d'un fil 17 SWG (1,42 mm de diamètre) recouvert d'une couche de 3,45 millimètres de polythène est de 0,0022 dB/m, et les distances radiales à l'intérieur desquelles se trouvent 50 et 90 % du flux d'énergie sont, respectivement, de 33 mm et de 233 mm. Un cornet émetteur de 22 cm de diamètre a un rendement, déterminé par le calcul, de 91,5 %.

A titre d'exemple, l'affaiblissement, à cette fréquence, d'un câble est de 0,2 dB/m, ce qui met en évidence les avantages du fil.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier M. le P^r GRIVET pour l'intérêt qu'il a apporté à ses travaux ainsi que M. BOUX pour ses encouragements et ses suggestions.

Cet article a été publié avec l'autorisation de la Marine Anglaise.

Manuscrit reçu le 6 juin 1956.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BOWEN (E.). Radar observations of rain and their relation to the mechanism of rain formation (Observations au radar concernant la pluie, et

- leurs rapports avec le mécanisme de formation de la pluie). *J. atmosph. terrestr. Phys.*, G.-B. (1951), **1**, p. 125.
- [2] HOOPER (N.) KIPPAX (A.). Radar echoes from meteorological precipitations (Echos de radar, provoqués par des précipitations aqueuses). *Proc. Inst. electr. Engrs. G.-B. Part. I.*, (1950), **97**, p. 89.
- [3] HOOD (A.). Quantitative measurements at three and ten centimetres of radar echo intensities of precipitations (Mesures quantitatives à 10 000 et 3 000 MHz des intensités des échos de radar provoqués par des précipitations), *National Research Council of Canada, Report E. R. A 180*.
- [4] RYDE (J.). Attenuation and radar echoes produced at centimetre wavelengths by various meteorological phenomena (Affaiblissement et échos de radar produits, en ondes centimétriques, par divers phénomènes météorologiques), publié dans *Meteorological factors in radio wave propagation* (Influence des phénomènes météorologiques sur la propagation des ondes hertziennes), *Physical society and royal meteorological society, Londres*, (1948).
- [5] LORD RAYLEIGH. On images formed without reflection or refraction (Des images formées en l'absence de réflexion et réfraction), *Philos. Mag. G.-B.* (1881), **11**, p. 214 « On pin-hole photography » (De la photographie sans objectif), *Ibid.*, (1891), **31**, p. 87.
- [6] RAMSAY (J.). Circular polarization for C. W. radar (Polarisation circulaire pour radar à ondes entretenues). *Marconi Rev.*, G.-B. (1952), **15**, p. 71.
- [7] KERR (D.). Propagation of short radio waves (Propagation d'ondes hertziennes courtes) *Mc Graw-Hill*, (1950), p. 576.
- [8] BOOKER (H.). WALKINSHAW (W.). The mode theory of tropospheric refraction and its relation to wave-guides and diffraction (La théorie des modes de la réfraction troposphérique, et ses relations avec les guides d'ondes et la diffraction) « Meteorological factors in radio-wave propagation » *Physical society and royal meteorological society, Londres* (1948).
- [9] WUST (G.). Die Verdunstung auf dem Meere (L'évaporation au-dessus de la mer). *Veroff. Inst. Meereskunde, Univ. de Berlin* (N. F.), (1920), Série A, n° 6, p. 66.
- [10] SAXTON (J.). Meteorological factors in radio wave propagation (Influence des phénomènes météorologiques sur la propagation des ondes hertziennes), *Physical society and royal meteorological society, Londres* (1948), p. 278.
- [11] BURROWS (C.). ATTWOOD (S.). Radio wave propagation (Propagation des ondes hertziennes) *Academic Press, Inc., New-York*, (1949).
- [12] SAXTON (J.), HOPKINS (H.). Some adverse influences of meteorological factors on marine navigational radar (De quelques effets gênants des phénomènes météorologiques sur les radars de navigation maritime). *Proc. Inst. electr. Engrs. G. B. Part. II* (1951), **98**, p. 26.
- [13] MILLAR (J.) BYAM (L.). A microwave propagation test (Essai relatif à la propagation des ondes centimétriques) *Proc. Inst. Radio Engrs, U. S. A.*, (1950), **38**, p. 619.
- [14] MILWRIGHT (A.). Communication non publiée.
- [15] *** International meeting on radio aids to marine navigation (Congrès international des aides radioélectriques à la navigation maritime). *H. M. Stationery Office*, (1946), **2**, p. 65.
- [16] DOMB (C.) PRYCE (M.). The calculation of field strengths over a spherical earth (Calcul des intensités des champs à la surface de la terre, supposée sphérique). *J. Instr. electr. Engrs. G. B. Part III*, (1947), **94**, p. 245.
- [17] DURKEE (A.). Results of microwave propagation tests on a 40-mile overland path (Résultats d'expériences de propagation d'ondes centimétriques sur un trajet de 64,3 km au-dessus de la terre ferme). *Proc. Inst. Radio Engrs. U. S. A.*, (1948), **36**, p. 197.
- [18] RANDALL-COOK (C.). Communication non publiée.
- [19] SOMMERFELD (A.). « Fortpflanzung elektrodynamischen Wellen an einem zylindrischen Leiter » (Propagation des ondes électromagnétiques à la surface d'un conducteur cylindrique). *Ann. Phys. und Chemie* (Nouvelle série), (décembre 1899), **67**, p. 233.
- [20] STRATTON (J.). Electromagnetic theory (La théorie électromagnétique) *Mc Graw-Hill*, (1941), 615 p.
- [21] DYOTT (R.). The launching of electromagnetic waves on a cylindrical conductor (Le « lancement » d'ondes électromagnétiques à la surface d'un conducteur cylindrique) *Proc Inst. electr. Engrs.*, (nov. 1952), **99**, pp. 408-413.
- [22] GOUBAU (G.). Single conductor surface-waves transmission lines (Transmission d'ondes guidées sur un fil conducteur unique) *Proc. Inst. Radio Engrs, U. S. A.*, (juin 1951), **39**, p. 619-524.
- [23] GOUBAU (G.). Surface waves and their applications to transmission lines (Des ondes superficielles et de leurs applications aux lignes de transmission), *J. appl. Phys.*, (nov. 1950), **21**, pp. 1119-1128.
- [24] ROBERTS (S.). HIPPEL (A. von). A new method for measuring dielectric constant and loss in the range of centimeter waves (Nouvelle méthode de mesure de la constante diélectrique et de l'angle de pertes en ondes centimétriques). *J. appl. Phys.*, (juil. 1946), **17**, pp. 610-616.
- [25] JAHNKE, EMDE, Tables of higher functions (Tables de fonctions d'ordre supérieur. *Dover publications*, (1948).
- [26] CHAVANCE (P.). Étude de la propagation des ondes centimétriques dans le nord de la France, *Ann. Télécommunic.*, Fr., (juin 1952), **6**, 7, pp. 254-261.
- [27] CHAVANCE (P.). BOITHIAS (L.), BLASSEL (P.), Étude de propagation d'ondes centimétriques dans la région méditerranéenne, *Ann. Télécommunic.*, Fr., (juin 1954), **9**, **6**, pp. 158-185.
- [28] MAILLARD (J.). VOGÉ (J.), CHAVANCE (P.), Un équipement mobile destiné aux études de propagation des ondes centimétriques, *Ann. Télécommunic.*, Fr., (mai 1952), **6**, **5**, pp. 131-144.
- [29] KLEIN (W.). LIBOIS (L. J.), Essai de transmission par faisceaux hertziens sur un long parcours en visibilité optique entre la France et la Suisse, *Onde électr.*, Fr., (déc. 1953), **33**, **321**, pp. 665-677.
- [30] VOGÉ (J.). Incidences météorologiques sur la propagation des ondes très courtes, *Onde électr.*, Fr., (mars 1948), **28**, **252**, pp. 99-107.
- [31] CHAVANCE (P.), CHIRON (B.). Une étude expérimentale de transmission d'ondes centimétriques sur guides d'ondes filiformes, *Ann. Télécommunic.*, Fr., (nov. 1953), **8**, **11**, pp. 367-378.
- [32] COLIN (J. F.). Étude de la propagation d'une onde électromagnétique guidée par une surface métallique recouverte d'une couche de diélectrique, *Onde électr.*, Fr., (mai 1951), **31**, **290**, pp. 245-256.
- [33] FROMAGEOT (A.). LOUIS (B.), Propagation d'ondes électromagnétiques le long d'un fil conducteur recouvert d'une mince couche diélectrique, *Bull. Soc. fr. Electriciens*, (juin 1951), **7-1**, **6**, pp. 291-302.

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par Faculté

Développements récents dans le domaine des lignes de transmissions aux ondes centimétriques.

Vu et approuvé :

Paris, le 1er Juin, 1956

Le Doyen de la Faculté des Sciences

J. PERES

Vu

et Permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie
de Paris,

Jean SARRAILH.

DEUXIÈME THÈSE

Revue de la littérature scientifique

Le présent ouvrage est le fruit d'un travail de recherche

réalisé pendant la période de

la période de

la période de

la période de

la période de

la période de

la période de

la période de

la période de

